

## BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

EP04103854



REC'D 12 JUL 2004	
WIPO	PCT

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 103 34 722.4

**Anmeldetag:** 30. Juli 2003

**Anmelder/Inhaber:** Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen/DE

**Bezeichnung:** Beleuchtungssystem für die Mikrolithographie

**IPC:** G 03 7/20

Postfach 103854

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 28. April 2004  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
 Der Präsident  
 Im Auftrag

Agurks

**PRIORITY DOCUMENT**  
 SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
 COMPLIANCE WITH  
 RULE 17.1(a) OR (b)

## Beleuchtungssystem für die Mikrolithographie

Die Erfindung betrifft ein Beleuchtungssystem für die Mikrolithographie, insbesondere mit Wellenlängen  $\leq 193$  nm, besonders bevorzugt die EUV-Mikrolithographie. Das Beleuchtungssystem dient der Ausleuchtung eines Feldes in einer Feldebene und umfasst wenigstens einen optischen Integrator und wenigstens eine optische Komponente, die im Lichtweg von einer Lichtquelle zu der auszuleuchtenden Feldebene zwischen dem optischen Integrator und der auszuleuchtenden Feldebene angeordnet ist.

Beleuchtungssysteme für die Mikrolithographie, insbesondere die Hochleistungslithographie mit Wellenlängen  $\leq 193$  nm, sind aus einer Vielzahl von Patentveröffentlichungen bekannt geworden.

Um die Strukturbreiten für elektronische Bauteile noch weitere reduzieren zu können, insbesondere in den Submikron-Bereich, ist es erforderlich, die Wellenlänge des für die Mikrolithographie eingesetzten Lichtes zu verringern. Denkbar ist die Verwendung von Licht mit Wellenlängen kleiner 193 nm, beispielsweise die Lithographie mit weichen Röntgenstrahlen, die so genannte EUV-Lithographie.

Die EUV-Lithographie ist eine der vielversprechendsten zukünftigen Lithographietechniken. Als Wellenlängen für die EUV-Lithographie werden derzeit Wellenlängen im Bereich 11 - 14 nm, insbesondere 13,5 nm diskutiert bei einer numerischen Apertur von 0,2 - 0,3. Die Bildqualität in der EUV-Lithographie wird bestimmt einerseits durch das Projektionsobjektiv, andererseits durch das Beleuchtungssystem. Das Beleuchtungssystem soll eine möglichst gleichförmige Ausleuchtung der Feldebene, in der die strukturtragende Maske, das so genannte Retikel, angeordnet ist, zur Verfügung stellen. Das Projektionsobjektiv bildet die Feldebene in eine Bildebene, die so genannte Waferebene ab, in der ein lichtsensitives Objekt angeordnet ist. Projektionsbelichtungsanlagen für die EUV-Lithographie sind mit reflektiven optischen Elementen ausgeführt. Die Form des

Feldes einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage ist typischerweise die eines Ringfeldes. Die Projektionssysteme werden üblicherweise im Scanning Mode betrieben. EUV-Projektionsbelichtungsanlagen sind beispielsweise aus der US-B-6,452,661 oder der US-B-6,198,793 oder der US-B-6,438,199 bekannt geworden, deren Offenbarungsgehalt in die vorliegende Anmeldung vollumfänglich mitaufgenommen wird.

Diese EUV-Beleuchtungssysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sie zur Anpassung der Étendue und zum Erzielen einer homogenen Ausleuchtung eines Feldes in einer Feldebene Wabenkondensoren umfassen. Wabenkondensoren sind auch als Fly's eye-Integratoren bekannt. Die Wabenkondensoren umfassen wenigstens einen optischen Integrator.

Ein optischer Integrator in den oben genannten Patenten US-B-6,452,661, US-B-6,198,793 und US-B-6,438,199 ist, ohne hierauf beschränkt zu sein, ein facettiertes optisches Element mit einer Vielzahl von Rasterelementen. Alternative Integratoren sind Diffusoren oder Stabintegratoren bzw. Hohlleiter. In einer bevorzugten Ausführungsform umfassen Wabenkondensoren zwei facettierte optische Elemente mit einer Vielzahl von Rasterelementen.

Wabenkondensoren in den Patenten US-B-6,452,661, US-B-6,198,793 und US-B-6,438,189 sind für die EUV-Lithographie in reflektiver Ausführung beschrieben. Wabenkondensoren in refraktiver Ausführung, z.B. für die Mikrolithographie mit Wellenlängen von 153 nm oder 193 nm sind aus einer Vielzahl anderer Veröffentlichungen allgemein bekannt.

Wabenkondensoren können in einer allgemeinen Definition auch als Diffusoren bezeichnet werden, welche einen bestimmten Divergenzwinkel einer Strahlung in einer konjugierten Pupillenebene eines Abbildungssystems wie beispielsweise eine Projektionsoptik für die Mikrolithographie erzeugen. Die Ebene, in oder kurz vor welcher der Diffusor oder Wabenkondensor angeordnet ist, ist damit eine zur

Austrittspupille des Beleuchtungssystems optisch konjugierte Ebene, welche mit der Eintrittspupille der nachfolgenden Abbildungsoptik zusammenfällt.

5 Diffusoren zur homogenen Ausleuchtung einer Feldebene sind aus einer Vielzahl von Anmeldungen bekannt geworden, beispielsweise aus der US 4,936,665, der US 4,521,087, der US 4,444,456 und der US 4,155,630. Die US 4,936,665, die US 4,155,630 und die US 6,573,978 zeigen Diffusoren, welche in oder in der Nähe einer konjugierten Ebene zur Austrittspupille eines Beleuchtungssystems angeordnet sind. Die Diffusoren sind dabei so ausgelegt, dass die 10 auszuleuchtende Feldebene in einer vorgegebenen Form nahezu homogen ausgeleuchtet wird. Dies wird erreicht, indem hinter den Diffusoren durch die optische Wirkung der Diffusoren ein bestimmter Divergenzwinkel der Strahlung vorliegt, so dass die Feldebene in vorgegebener Weise entsprechend der Divergenzwinkel hinter den Diffusoren ausgeleuchtet wird.

15 Neben Wabenkondensoren sind auch Lichtleiter wie beispielsweise Stabintegratoren oder Hohlleiter zur Ausleuchtung einer Ebene bekannt geworden. Beispielsweise ist in der US 3,541,323 eine Kombination von facettierten optischen Elementen und Lichtleitern zum Einsatz der 20 Homogenisierung von Laserstrahlung offenbart. Lichtleiter der in der US 4,918,583 beschriebenen Art werden zwar weitläufig als verwandt und als gegen facettierte optische Elemente austauschbar bezeichnet, weisen jedoch einen signifikanten Unterschied auf. Lichtleiter oder Stabintegratoren, wie sie auch aus beispielsweise der US 1,880,414 bekannt sind, erzeugen nämlich auf der Austrittsseite bereits 25 eine homogen ausgeleuchtete Ebene, die in der Regel zu der auszuleuchtenden Feldebene konjugiert angeordnet ist. Der Querschnitt des Lichtleiters oder Stabintegrators wird daher vorzugsweise in Form der auszuleuchtenden Ebene gewählt, und die Lichtaustrittsfläche wird mit Hilfe einer abbildenden Optik in die auszuleuchtende Feldebene abgebildet. Die Eintrittsfläche des Stabes, im 30 Wesentlichen von gleicher Form wie die Austrittsfläche, jedoch möglicherweise von anderer Größe, entspricht damit ebenfalls der auszuleuchtenden Feldebene.

Ein- und Austrittsfläche des Stabintegratoren sind also im weiteren Sinne beide zur Feldebene konjugiert.

5 Beim Wabenkondensor und beim Diffusor ist das facettierte optische Element in einer konjugierten Pupillenebene im Sinne des Köhler'schen Beleuchtungsprinzips angeordnet, d.h. die Austrittsfläche des Wabenkondensors wird in die Austrittspupille des Beleuchtungssystems, die der Eintrittspupille einer nachfolgenden Abbildungsoptik entspricht, mit Hilfe einer optischen Komponente abgebildet. Üblicherweise werden bei einem Wabenkondensor durch die ersten 10 Rasterelemente, die im Folgenden auch Feldwaben genannt werden, Lichtbündel in einem einfachen Verhältnis den zweiten Rasterelementen, die im Folgenden auch Pupillenwaben genannt werden, zugeführt, beispielsweise so, dass sich Feldwabe und Pupillenwabe räumlich an vergleichbarer Stelle auf dem ersten bzw. zweiten facettierten optischen Element befindet. In diesem Fall entspricht 15 dann die Eintrittsebene des Wabenkondensors, in der die Feldwaben angeordnet sind, im Wesentlichen einer Pupillenebene. Das bedeutet, dass das zweite facettierte optische Element so ausgeleuchtet wird wie das erste optische Element, beispielsweise mit kreisförmigen Ausleuchtungen verschiedenen Durchmessers, mit schiefer symmetrischer Ausleuchtung wie auch aus der 20 Mikroskopie bekannt, oder annularer Ausleuchtung.

Wie oben beschrieben werden in Wabenkondensoren als optische Mittel zur Aufspaltung eines einfallenden Lichtflusses bzw. eines auf diese auftreffendes Lichtbündel in eine Vielzahl von Lichtbündeln und gegebenenfalls zur 25 Wiedervereinigung und Überlagerung der aufgespaltenen Lichtflüsse facettierte optische Elemente eingesetzt. Beispielsweise können diese facettierten optischen Elemente mit einer Vielzahl von Rasterelementen als Linsenarrays ausgebildet sein. Eine optische Wirkung der einzelnen Rasterelemente ist aber nicht in allen Anwendungsfällen erforderlich. Dann können die einzelnen Rasterelemente auch 30 als Planspiegel oder Prismen ausgebildet sein. Generell können die Rasterelemente refraktiv, reflektiv oder diffraktiv ausgeführt werden. Einen

refraktiven Wabenkondensor zeigt beispielsweise die US 5,098,184 und die US 5,594,526.

Die US-Patente 2,183,249 und 2,186,123 offenbaren jeweils einen Wabenkondensor mit zwei facettierten Elementen, die jeweils als Linsenarray ausgebildet sind, zur homogenen Ausleuchtung einer Feldebene. Die in der Ebene vor dem Wabenkondensor einfallende Strahlung bzw. das auf dem Wabenkondensor auftreffende Lichtbündel wird im Wabenkondensor dabei kanalweise in einzelne Strahlungsflüsse bzw. eine Vielzahl von Lichtbündeln zerlegt. In der Austrittsebene des Wabenkondensors, die auch als Pupillenebene bezeichnet wird, wird eine Vielzahl von sekundären Lichtquellen gebildet. Die Form der ersten Rasterelemente des ersten facettierten optischen Elementes des Wabenkondensors wird durch die zweiten Rasterelemente des zweiten facettierten optischen Elementes und eine im Lichtweg von der Lichtquelle zur auszuleuchtenden Ebene des Beleuchtungssystems zwischen dem Wabenkondensor und der auszuleuchtenden Ebene angeordneten optischen Komponente in ein auszuleuchtendes Feld abgebildet, in der die Vielzahl von Lichtbündeln, die von der Vielzahl der ersten Rasterelemente ausgehen, überlagert werden. Die Form der ersten Rasterelemente bestimmt damit die Form des ausgeleuchteten Feldes, weshalb die ersten Rasterelemente auch als Feldwaben bezeichnet werden. Die zweiten Rasterelemente sind in oder nahe einer zur Austrittspupille konjugierten Pupillenebene angeordnet, in der die Vielzahl von sekundären Lichtquellen ausgebildet wird. Die zweiten Rasterelemente werden daher auch als Pupillenwaben bezeichnet. Die Form der Pupillenwaben wird bevorzugt so gewählt, dass sie der Form der sekundären Lichtquelle entspricht. In den oben genannten Schriften ist die Form der ersten Rasterelemente jeweils wie die des auszuleuchtenden Feldes gewählt, also rechteckig, und die Form der zweiten Rasterelemente sechseckig gewählt, die damit in etwa der Form der runden Lichtquellen entspricht. Die US 2,183,249 zeigt ferner einen Wabenkondensor bestehend aus reflektiven Feldwaben und refraktiven Pupillenwaben. Bereits in der DE 561 573 ist eine ähnliche Anordnung bestehend aus reflektiven Feldwaben und refraktiven Pupillenwaben gezeigt. In

der DE 28 03 277 ist gezeigt, wie refraktive Wabenkondensorsysteme in reflektive Wabenkondensorsysteme übergeführt werden können. Hierzu zeigt die Figur 6 der zitierten Patentschrift einen refraktiven Wabenkondensor, die Figur 7 das entsprechende Beispiel eines reflektiven Wabenkondensors, jeweils zur homogenen Ausleuchtung einer Feldebene, in der im zitierten Beispiel eine Maske zur Belichtung eines Substrates zur Herstellung von Halbleiterbauelementen angeordnet ist.

Die US 3,941,475 zeigt einen Wabenkondensor mit einer in der Nähe des Wabenkondensors angeordnete Blende, um das Beleuchtungssetting für die Mikrolithographie zu variieren. Die US 3,988,066 schlägt schließlich in Verbindung mit einem Wabenkondensor weitere Mittel vor, womit das Beleuchtungssetting strukturabhängig variiert werden kann. Die US 5,237,367 offenbart einen Wabenkondensor mit einer davor angeordneten Zoom-Optik zur Änderung der Pupillenausleuchtung und des Abbildungssettings.

Die US 4,497,013 schlägt zur weiteren Verbesserung der Lichtdurchmischung eine Anordnung mehrerer Integratoren vor, beispielsweise zwei Wabenkondensoren in Folge.

Die US 4,683,524 offenbart einen Wabenkondensor als Mittel zur Erzeugung einer homogenen Ausleuchtung in einer Feldebene, wobei die Pupillenausleuchtung zur Ausleuchtung der Maske mit entsprechenden Beleuchtungswinkeln durch geeignete Wahl der Ausdehnung des Wabenkondensors erreicht wird. Dabei wird die Ausleuchtung des Wabenkondensors so ausgelegt, dass die äußeren Bereiche Wabenkondensors und damit der Pupille am Pupillenrand stärker ausgeleuchtet werden.

Die US 5,335,044 zeigt einen refraktiven Wabenkondensor mit einer in der Nähe des Wabenkondensors angeordneten Blende zur Beschneidung nur teilweise ausgeleuchteter Feldwaben, um eine homogenere Feldebenenausleuchtung zu gewährleisten.

Die US 6,049,374 zeigt einen Wabenkondensor mit einem Filterelement in einer zur Feldebene konjugierten Ebene, um feldabhängige Abweichungen von den idealen Abbildungseigenschaften durch ein über das Feld variierendes Abbildungssetting zu kompensieren.

Wie zuvor erwähnt, erfordern Wabenkondensoren eine Abbildungsoptik, welche eine Pupillenabbildung durchführt. Da in der Ausgangsebene des Wabenkondensors, die ja eine konjugierte Pupillenebene ist, oder in deren unmittelbarer Nähe liegt, die sekundäre Lichtquelle ausgebildet wird, kann über eine bestimmte Auswahl der Lichtkanäle zwischen erstem facettierten optischen Element und zweitem facettierten optischen Element, beispielsweise über eine Kanalauswahlblende oder eine entsprechende strukturierte Ausleuchtung des Wabenkondensors eine nahezu beliebige Pupillenausleuchtung erreicht werden, wie beispielsweise in den Patentschriften US 3,941,475 und US 4,109,304 beschrieben. In der ersten Schrift wird die Pupillenausleuchtung durch Blenden in der Nähe der facettierten optischen Elemente gesteuert, in der zweiten Schrift wird annulare Beleuchtung durch optische Mittel erzeugt, was mit weniger Lichtverlusten verbunden ist. Auch der Einsatz von Zoom-Systemen ist zur Steuerung der Pupillenausleuchtung im Sinne Köhler'scher Beleuchtung bekannt, wie beispielsweise in der US 4 241 389 offenbart.

Durch die Überlagerung vieler Lichtbündel in der Feldebene wird mit Hilfe der Wabenkondensoren eine für konventionelle Anwendungen ausreichend gute Lichtdurchmischung erreicht. Auch eine weitgehend homogene Ausleuchtung in der Feldebene ist damit erreichbar, wenn von der Forderung einer Feldunabhängigen Pupillenausleuchtung abgesehen werden kann. Nachteilig an den Beleuchtungssystemen gemäß dem Stand der Technik war, dass keine über das ausgeleuchtete Feld weitgehend gleichmäßig ausgeleuchtete Pupille erreicht wurde.



Aufgabe der Erfindung ist es somit, eine fehlerfreie und möglichst feldunabhängige, über das Feld gleichmäßige Ausleuchtung der Austrittspupille in der Pupillenebene zu erzielen, wie es bei Hochleistungs-Lithographieanlagen erforderlich ist, dass heisst, dass sich die über das Feld eingestellten Kohärenzparameter nicht ändern.

Des Weiteren soll das Feld selbst in der Feldebene weitgehend gleichmäßig ausgeleuchtet werden.

Gelöst wird diese Aufgabe dadurch, dass das Beleuchtungssystem wenigstens einen optischen Integrator aufweist, der Licht einer Lichtquelle in eine Vielzahl von Lichtkanälen mit einer Lichtintensität aufspaltet und ein Filter mit wenigstens einem Filterelement vorgesehen ist, wobei das Filterelement derart aufgebaut ist, dass die Lichtintensität wenigstens eines Lichtkanals abgeschwächt wird.

In einer weitergebildeten Ausführungsform ist eine optische Komponente vorgesehen, die im Lichtweg zwischen dem Wabenkondensor und der auszuleuchtenden Feldebene angeordnet und vorzugsweise ausreichend aplanatisch korrigiert ist. Das Beleuchtungssystem umfasst ein Filter mit wenigstens einem Filterelement, (das) die derart ausgestaltet und angeordnet (ist) sind, dass eine weitgehend homogene Ausleuchtung des Feldes in der Feldebene erreicht wird.

Wie dem Fachmann hinlänglich bekannt, bedingen sich aplanatische Korrektur und Erfüllung der Sinusbedingung gegenseitig und sind nur verschiedene Beschreibungen desselben Sachverhaltes; beide Begriffe werden daher synonym verwendet.

Als aplanatisch korrigiert gilt ein optisches System dann, wie von E. Abbe in „Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung“, M. Schultze's Archiv für mikroskopische Anatomie, Vol. IX, 413 – 468 (1873) gezeigt, wenn zwischen der Strahlhöhe  $p$  in einer Pupillenebene und dem

Strahlwinkel  $\vartheta$  in einer Feldebene die Beziehung  $p = f \sin \vartheta$  einstellt, wobei  $f$  die Brennweite der Linsengruppe zwischen Pupillen- und Feldebene ist. In analoger Weise spricht man auch im umgekehrten Fall von aplanatischer Korrektur, wenn sich zwischen dem Strahlwinkel  $b$  in einer Pupillenebene und der Strahlhöhe  $x$  in einer Feldebene eine Beziehung  $x = f \sin b$  einstellt. Im vorliegenden Fall entspricht die Linsengruppe der obengenannten optischen Komponente, die zwischen dem Wabenkondensor und der auszuleuchtenden Feldebene angeordnet ist. Die Ausdehnung des Wabenkondensors mit Durchmesser  $2p_{\max}$  überträgt sich damit in ein konstantes Winkelspektrum in der Feldebene mit dem Sinus des Maximalwinkels  $\sin \vartheta_{\text{bel}} = p_{\max} / f$ . Die Feldausleuchtung bis zur Feldhöhe  $x_{\max}$  ist damit durch den Sinus des Aperturwinkel  $\sin b_{\max}$  in einer Pupillenebene, i.e. hinter dem Wabenkondensor, mit  $\sin b_{\max} = x_{\max} / f$  gegeben.  $f$  ist hierbei die Brennweite der Linsengruppe zwischen Pupillen- und Feldebene. Dies ist in Figur 3 veranschaulicht.

Unter hinreichender Erfüllung der aplanatischen Korrektur bzw. der Abbe'schen Sinusbedingung, d. h. dass das optische Element ausreichend aplanatisch korrigiert ist, wird verstanden, dass die Gleichung  $\sin \vartheta = p / f$  besser als zu 10%, besonders bevorzugt besser als 2%, für alle Pupillenkoordinaten  $p$  erfüllt wird, d.h. alle Lichtstrahlen, welche in einer Pupillenebene einen Punkt  $p$  schneiden, verlaufen im Bereich der Feldebene zueinander parallel mit max. Winkelabweichungen dergestalt, dass die Sinusse der Ausbreitungswinkel um weniger als 10%, besonders bevorzugt weniger als 2% variieren. In analoger Weise soll unter hinreichender aplanatischer Korrektur verstanden werden, wenn die Strahlen eines Strahlbüschels mit einem Strahlwinkel  $b$  zur optischen Achse, der eine Pupillenebene passieren, sich entsprechend  $x = f \sin b$  in einem Punkt  $x$  in der Feldebene schneiden mit maximalen Punktbildfehlern von 10%, besonders bevorzugt 2%, der Feldhöhe  $x$ .

Dies entspricht für die Abbildung von der Ebene hinter dem Wabenkondensor in die Eintrittspupille einer Abweichung von der Abbe'schen Sinusbedingung um

weniger als 10 %, besonders bevorzugt von weniger als 2%, d.h. der Abbildungsmaßstab  $\beta$  für die Abbildung von der Ebene hinter dem Wabenkondensor in die Eintrittspupille darf über den Winkel  $b$  eines Strahls hinter dem Wabenkondensor bezüglich der optischen Achse um maximal 10% variieren.

Damit ist ein Variation des maximalen Aperturwinkels  $\vartheta_{\text{bel}}$  in der Feldebene von weniger als 10%, besonders bevorzugt 2%, gewährleistet, entsprechend einer sogenannten  $\sigma$ -Variation von weniger als 10%, besonders bevorzugt 2%.

Gehorcht die optische Komponente hinreichend der Abbe'schen Sinusbedingung, dann ist die optische Komponente sehr gut sinus-korrigiert, was dazu führt, dass die Abbildung der sekundären Lichtquelle in die Austrittspupille des Beleuchtungssystems, die mit der Eintrittspupille des Projektionsobjektives einer Projektionsbelichtungsanlage zusammenfällt, praktisch fehlerfrei ist. Durch die aplanatische Korrektur wird erreicht, dass jede einem jeweiligen Feldpunkt des auszuleuchtenden Feldes in der Feldebene zugeordnete Pupille in der Ebene der Eintrittspupille immer in etwa gleich groß ist. Im Folgenden wird dies am Beispiel eines telezentrischen Systems erläutert. Bei einem telezentrischen System sind die Pupillenebene und die Feldebene zueinander Fourier-invers, d.h. die Eintrittspupille liegt aus Sicht des Retikels im Unendlichen. Bei Erfüllung der Sinusbedingung wird dann erreicht, dass parallele Strahlen aus der Pupillenebene sich in der Feldebene in einem gemeinsamen Punkt schneiden. Liegt hinter dem Wabenkondensor oder Diffusor also eine bestimmte Abstrahlcharakteristik vor, so bestimmen alle Strahlen, welche einen bestimmten Neigungswinkel zur optischen Achse haben, die Bestrahlungsstärke an diesem einen zugeordneten Punkt in der Feldebene. Besitzt der Wabenkondensor oder Diffusor eine homogene Abstrahlung innerhalb eines bestimmten Bereichs, so empfängt umgekehrt jeder Feldpunkt Strahlung aus diesem Bereich des Wabenkondensors oder Diffusors. Soll der vom Retikel aus wirksame Bereich des Wabenkondensors oder Diffusors feldunabhängig sein, d.h. an jedem Feldpunkt das gleiche Winkelspektrum an

Beleuchtungsstrahlen vorliegen, so wird dies definitionsgemäß durch die aplanatische Korrektur und Erfüllung der Sinusbedingung für die Abbildung der Austrittsebene des Wabenkondensor bzw. Diffuser in die Austrittspupille erreicht. Die gegebene Ableitung für telezentrische Verhältnisse sind ohne Beschränkung auf für den Fachmann naheliegende Weise auf den nicht-telezentrische Beleuchtungsfall übertragbar.

Um eine gleichmäßige Ausleuchtung der den jeweiligen Feldpunkten zugeordneten Pupillen in der Austrittspupille zu erreichen, ist es vorteilhaft, wenn der auf das erste optische Element mit Rasterelementen einfallende Lichtfluss weitgehend gleichmäßig ist. Eine gleichmäßige Ausleuchtung des ersten optischen Elements mit Rasterelementen, d.h. der Feldwabenplatte, führt dann zu gleichmäßig hellen sekundären Lichtquellen in der Austrittsebene des Wabenkondensors, wobei die Divergenzwinkel der einzelnen Lichtbüschel der sekundären Lichtquellen durch die Feldwabe begrenzt ist.

Um sowohl eine gleichförmig ausgeleuchtete Pupille für jeden Feldpunkt in der Feldebene wie ein homogen ausgeleuchtetes Feld in der Feldebene zu erreichen, ist es notwendig, Mittel vorzusehen, die dafür sorgen, dass die Abstrahlungscharakteristik der sekundären Lichtquellen innerhalb der maximalen Divergenzwinkel sich nahezu wie ein Lambert'scher Strahler verhält, d.h. die Strahlstärke  $I(\alpha)$ , das ist der Strahlungsfluss  $\Phi_e$  eines Lichtbüschels, welcher unter einem Winkel  $\alpha$  in ein Raumwinkelement  $d\Omega$  abgestrahlt wird, sich zu einer Strahlstärke  $I(0)$  eines Lichtbüschels, der parallel zur optischen Achse abgestrahlt wird, wie der Cosinus des Abstrahlungswinkels verhält.

In der vorliegenden Anmeldung werden die in nachfolgender Tabelle aufgeführten lichttechnischen Begriffe, nach Naumann/Schröder, „Bauelemente der Optik“, Hauser-Verlag 1992, S. 28 – 29, verwandt.

Tabelle 1: Lichttechnische Begriffe

Physikalische Größe	Formel	Einheit
Strahlungsfluss $\Phi_e$ (Radiant/Flux)	$\Phi_e = \frac{\partial Q}{\partial t}$	Watt [W]
Bestrahlungsstärke $E_e$ (Irradiance oder Flux density)	$E_e = \frac{d\phi_e}{d A_o}$	Watt / cm <sup>2</sup>
Strahlstärke $I_e$ (Radiant Intensity)	$I_e = \frac{d\phi_e}{d \Omega}$	Watt / Steradian
Strahldichte $L_e$ (Radiance)	$L_e = \frac{d\phi_e}{d A_s \cdot \cos \alpha d \Omega}$	Watt / cm <sup>2</sup> / Steradian

5 Eine homogene Ausleuchtung des Feldes in der Feldebene wird nur dann erreicht werden, wenn die durch den Wabenkondensor und eine eventuell vorhergehende Optik erzeugten sekundären Lichtquellen eine Abstrahlungscharakteristik vergleichbar einem Lambertstrahler hat. Eine solche Abstrahlungscharakteristik liegt im Allgemeinen nicht vor. Insbesondere bei Beleuchtungssystemen, wie sie bei EUV-Lithographie zum Einsatz kommen, wird eine solche

10 Abstrahlungscharakteristik nicht erreicht.

Erfindungsgemäß ist daher wenigstens ein Filterelement vorgesehen, um die Homogenität des auszuleuchtenden Feldes zu korrigieren bzw. für eine entsprechende Abstrahlungscharakteristik der sekundären Lichtquellen zu sorgen.

15 Die hierfür erfundenen Mittel sind im Wesentlichen Filterelemente, insbesondere Graufilter, welche über eine ortsabhängige Variation der Transmission, d. h. einer ortsabhängigen Abschwächung der Lichtintensität eines Lichtkanals eine Filterung der Strahlung dergestalt vornehmen, dass die Abstrahlung der sekundären Lichtquellen hinreichend Lambert-förmig wird, d.h. die Dichte der Strahlungsflüsse der einzelnen von den ersten Rasterelementen, d.h. den Feldwaben ausgehenden Lichtbündel, ortsabhängig so variiert wird, dass sich eine homogene

20

Ausleuchtung der Feldebene einstellt. Bevorzugt liegt die Abschwächung im Bereich  $> 0\%$  bis  $< 100\%$  der gesamten eingestrahlten Lichtintensität eines Lichtkanales, d. h. beispielsweise die Transmission des Filterelementes liegt für die gesamte Lichtintensität eines Lichtkanales im Bereich  $> 0\%$  bis  $< 100\%$ .

5 Ganz besonders bevorzugt liegt die Abschwächung der gesamten Lichtintensität eines Lichtkanales im Bereich  $> 25\%$  bis  $< 80\%$ , d. h. die Transmission des Filterelementes liegt für den gesamten Lichtkanal im Bereich  $> 20\%$  bis  $< 75\%$ .

10 Die erfindungsgemäßen Filterelemente sind ferner kombinierbar mit anderen Mitteln zur Änderung der Kohärenzparameter und, falls eine Anpassung an diese anderen Mittel erforderlich ist, ebenfalls änderbar beispielsweise durch Austausch oder aktive Elemente. Soll beispielsweise durch Blenden oder andere optische Elemente wie konische Elemente, diffraktive Elemente oder Prismen das Abbildungssetting von kreisförmiger Ausleuchtung der Austrittspupille auf annulare Beleuchtung oder multipolare Beleuchtung geändert werden, so muss  
15 gegebenenfalls der erfindungsgemäße Korrektionsfilter erforderlichenfalls angepasst werden bzw. es kann die Setting- oder Kohärenzparametereinstellung direkt über den erfindungsgemäßen Korrektionsfilter erfolgen, welcher dann zur Einstellung eines jeweiligen Settings beispielsweise über ein Filterrad gewechselt wird.

20 In einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist das auszuleuchtende Feld ein Ringfeld mit einer azimuthalen und einer radialen Ausdehnung.

25 Wird das Ringfeld mit Hilfe einer feldformenden optischen Komponente gebildet, so ist es vorteilhaft, wenn das optische Element wenigstens in radialer Ausrichtung des Feldes in der auszuleuchtenden Feldebene ausreichend aplanatisch korrigiert ist. In der anderen Richtung, d.h. in azimuthaler Richtung bezogen auf die Pupillenkoordinaten, ist dies aufgrund der feldformenden Optik nicht möglich.  
30

Das Filterelement, das für eine weitgehend homogene Ausleuchtung des Feldes in der Feldebene sorgt, kann im Lichtweg von der Lichtquelle zur Feldebene nahe dem optischen Integrator als separates Bauteil angeordnet sein oder in den optischen Integrator integriert sein. In einer ersten Ausgestaltung der Erfindung wird im Falle das Filterelement als separates optisches Bauteil ausgeführt, so kann es im Lichtweg von der Lichtquelle zur Feldebene vor und in der Nähe des optischen Integrators angeordnet werden. Alternativ ist es möglich, das Filterelement im Lichtweg von der Lichtquelle zur Feldebene nach und nahe dem optischen Integrator anzuordnen. In einer besonders bevorzugten Ausführungsform weist der optische Integrator ein erstes facettiertes optisches Element mit einer Vielzahl von ersten Rasterelementen auf. In einer besonders vorteilhaften Ausführungsform umfasst der optische Integrator des Weiteren ein zweites facettiertes optisches Element mit einer Vielzahl von zweiten Rasterelementen. Im Falle eines doppelfacettierten optischen Integrators ist es möglich, den erfindungsgemäßen Filter im Lichtweg von der Lichtquelle zur Feldebene zwischen dem ersten facettierten optischen Element und dem zweiten facettierten optischen Element anzuordnen.

Anstelle eines Wabenkondensors, der als optischer Integrator mit einzelnen, diskreten Facetten ausgeführt ist, ist es auch möglich, in einem Beleuchtungssystem die Wirkung eines Wabenkondensors durch einen Diffusor, der als eine Freiformfläche ausgebildet sein kann, zu erzielen. Solche Freiformflächen zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht aus Einzelementen aufgebaut sind, sondern stetig differenzierbar über die ganze Fläche sind. Die Freiformfläche weist eine Vielzahl von Erhebungen und Vertiefungen auf. Die Erhebungen und Vertiefungen definieren Punkte eines Gitternetzes. Jedes Flächenstück zwischen den Gitternetzpunkten kann durch eine lokal stetig differenzierbare Funktion, insbesondere eine lokal zweifach stetig differenzierbare Funktion, so genannte Splines, beschrieben werden. Ein einfaches Beispiel für solch einen Diffusor, bestehend aus einer Freiformfläche, ist beispielsweise aus der EP 1 024 408 bekannt geworden.

Da die Erfindung nicht alleine auf reflektive Beleuchtungssysteme beschränkt ist, sondern auch refraktive Beleuchtungssysteme umfasst, kann das Filterelement sowohl als transmissives Filterelement mit variabler Transmission wie als reflektives Filterelement mit variabler Reflektivität ausgelegt sein.

5

Eine besonders bevorzugte Ausführungsform stellt ein Filterelement dar, das als variabler Graufilter ausgebildet ist, wobei der variable Graufilter eine variable Linien- und/oder Punktdichte aufweist, so dass die Grauwerte des Graufilters durch die Linien- und/oder Punktdichte eingestellt werden kann.

10

Um für verschiedene Beleuchtungssettings stets eine homogene Ausleuchtung der Feldebene zu erreichen, ist es mit Vorteil vorgesehen, dass das Filterelement tauschbar ist.

15

Neben dem Beleuchtungssystem stellt die Erfindung auch eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie zur Verfügung, die einen erfindungsgemäßen Beleuchtungssystem umfasst sowie ein Verfahren zur Herstellung von mikrostrukturierten Bauteilen unter Verwendung einer erfindungsgemäßen Projektionsbelichtungsanlage.

20

Die Erfindung soll nachfolgend anhand der Ausführungsbeispiele und der Figuren beschrieben werden. Es zeigen:

25

Figur 1:     prinzipieller Aufbau eines Beleuchtungssystems in refraktiver Darstellung

Figur 2:     Beispiel für eine Kondensoroptik, die nicht  $\sigma$ -korrigiert ist

Figur 3:     Beispiel für eine Kondensoroptik, die  $\sigma$ -korrigiert ist

30



Figur 4: prinzipieller Aufbau eines Beleuchtungssystems in refraktiver Darstellung mit einem erfindungsgemäßen Korrektionelement

Figur 5: prinzipieller Aufbau eines Beleuchtungssystems in refraktiver Darstellung mit einem erfindungsgemäßen Korrektionelement im Strahlengang von der Lichtquelle zur Feldebene nach dem zweiten optischen Element mit zweiten Rasterelementen

Figur 6: prinzipieller Aufbau eines Beleuchtungssystems in refraktiver Darstellung mit einem erfindungsgemäßen Korrektionelement im Strahlengang von der Lichtquelle zur Feldebene zwischen dem ersten optischen Element mit ersten Rasterelementen und dem zweiten optischen Element mit zweiten Rasterelementen

Figur 7: prinzipieller Aufbau eines Beleuchtungssystems in refraktiver Darstellung mit einem erfindungsgemäßen Korrektionelement im Strahlengang von der Lichtquelle zur Feldebene vor dem ersten optischen Element mit ersten Rasterelementen

Figur 8A-8B Darstellung eines auszuleuchtenden Ringfeldes in der Feldebene sowie Verlauf der scan-integrierten Uniformität entlang der x-Achse

Figur 9: Beispielhaftes Filter mit vier Filterelementen für vier Wabenkanäle bzw. Lichtkanäle zur Anordnung im Lichtweg nach dem zweiten optischen Element mit zweiten Rasterelementen

Figur 10: Beispielhaftes Filter für einen Wabenkanal zur Korrektur ortsabhängiger Fertigungsfehler

Figur 11: Filter mit sechs Filterelementen für sechs Wabenkanäle bzw. Lichtkanäle zur Anordnung im Lichtweg von der Lichtquelle zur

auszuleuchtenden Feldebene vor dem ersten optischen Element mit  
ersten Rasterelementen

5      Figur 12:      beispielhafter Aufbau einer Projektionsbelichtungsanlage,  
                         insbesondere für die Mikrolithographie

Figur 13      auszuleuchtendes Feld in einer Feldebene mit eingezeichnetem  
                         Scanweg

10      Figur 14      eine einzelne Feldwabe mit eingezeichnetem Scanweg

Figur 15:      scan-integrierte Uniformität in der Feldebene eines Systems gemäß  
                         Figur 12 ohne Korrektionsselement

15      Figur 16:      scan-integrierte Uniformität in der Feldebene eines Systems gemäß  
                         Figur 12 mit einem erfindungsgemäßen Korrektionsselement

Figur 17A-B: Struktur von Austrittspupillen für annulare Ausleuchtung und  
                         unterschiedliche Feldpunkte des Ringfeldes

20      Figur 18A-B: Struktur von Austrittspupillen für dipolare Ausleuchtung für  
                         unterschiedliche Feldpunkte des Ringfeldes

25      Figur 19:      auszuleuchtendes Ringfeld in der Feldebene mit unterschiedlichen  
                         Feldpunkten, sowie zwei Beispiele für Feldwaben mit Feldblenden  
                         zur Einstellung eines Beleuchtungsettings.

Figur 20-23: Struktur von Austrittspupillen für quadropolare Ausleuchtung für  
                         unterschiedliche Feldpunkte des Ringfeldes

30      Figur 24:      Blende vor den Feldwaben gemäß WO 02/27401

Figur 25: Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Filters mit einer Vielzahl von Filterelementen für ein erstes optisches Element mit Feldwaben.

Die Erfindung gibt ein Beleuchtungssystem an, das eine über das ausgeleuchtete Feld für jeden Feldpunkt in Form und Lage gleichförmige und gleichmäßig ausgeleuchtete Pupille zur Verfügung stellt sowie eine homogene Ausleuchtung einer Feldebene bei gleichzeitiger Konstanz der Kohärenzparameter über das Feld.

In den Figuren 1 bis 5 werden die Anordnungen des Filterelements anhand refraktiver Ausführungsbeispiele beschrieben. Die Erfindung ist hierauf nicht beschränkt. Selbstverständlich kann ein Fachmann das allgemeine Prinzip auf reflektive Systeme oder hybride Systeme, gegebenenfalls auch unter Einsatz von diffraktiven oder holographisch-optischen Elementen, sehr einfach übertragen.

Figur 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Beleuchtungssystems in refraktiver Darstellung. Ein Lichtbüschel mit einem von der Lichtquelle ausgehendem Lichtfluss 1 fällt auf einen optischen Integrator 3, der als Wabenkondensor oder Diffusor ausgebildet sein kann. Mit dem Diffusor oder Wabenkondensor 3 wird ein Lichtfluss mit einem Aperturwinkel  $b$  erzeugt, der in Abhängigkeit von der nachfolgenden optischen Komponente, die auch als Kondensoroptik 5 bezeichnet wird, dergestalt gewählt ist, dass die strukturtragende Maske in der Feldebene 9 innerhalb eines bestimmten Bereiches 7 weitgehend homogen ausgeleuchtet wird. Gleichzeitig wird zumindest beinahe jeder Feldpunkt in dem ausgeleuchteten Feld 7 aus verschiedenen Winkeln entsprechend des eingestellten Beleuchtungssettings gleichmäßig beleuchtet. Das Beleuchtungssetting wird beispielsweise in einer strahlformenden Optik vor dem Diffusor oder Wabenkondensor 3 eingestellt, oder in der Nähe der Wabenkondensors oder Diffusors 3. In Figur 1 ist eine optionale Blende 40 zur Einstellung der numerischen Apertur  $NA_{bel} = \sin \vartheta_{bel}$  des Beleuchtungssystems hinter dem Wabenkondensor oder Diffusor 3 eingezeichnet; Im gezeigten Beispiel fällt damit die hintere Ebene 4 des Diffusors oder Wabenkondensors 3 mit einer zur

Austrittspupille des Beleuchtungssystems konjugierten Ebene - die so genannte konjugierte Pupillenebene - zusammen und die optionale Blende 40 liegt in oder in direkter Nähe zu dieser Ebene 4.

5 Bei einem EUV-Beleuchtungssystem, das doppelt facettiert ist, wie beispielsweise in der US 6,198,793 beschrieben, deren Offenbarungsgehalt vollumfänglich mit eingeschlossen ist, fällt die konjugierte Pupillenebene mit der Ebene der so genannten Pupillenfacetten oder Pupillenwaben des zweiten facettierten Elements zusammen. Bei Wabenkondensoren bestehend aus Feld- und Pupillenwaben liegen bekanntlich allgemein die Pupillenfacetten in der Austrittsebene des Wabenkondensors, d.h. in oder in der Nähe der Ebene 4 in Fig. 1.

10 Die Abbildung der sekundären Lichtquellen über eine Kondensoroptik 5 in die Eintrittspupille 15 des Projektionsobjektives 21, die mit der Austrittspupille des Beleuchtungssystems zusammenfällt, muss sehr gut korrigiert sein, insbesondere dürfen kein Koma-Fehler auftreten. Dies wird dann erreicht, wenn die optische Komponente hinreichend der Abbe'schen Sinusbedingung gehorcht, d.h. aplanatisch korrigiert ist. Würde die Abbe'sche Sinusbedingung nicht erfüllt, so würde dies bedeuten, dass die Abbildungsmaßstab nicht über den Abstrahlwinkel konstant wäre, d.h. die Pupille würde für verschiedene Feldpunkte im auszuleuchtenden Feld 7 unterschiedlich groß erscheinen. Dies entspräche einer  $\sigma$ -Variation. Eine  $\sigma$ -Variation ist eine Variation des Divergenzwinkels der Beleuchtungsstrahlen am Retikel über das Feld, wobei  $\sigma$  bei konventioneller, kreisrunder Beleuchtung üblicherweise das Verhältnis aus dem Sinus des maximalen Winkel  $\vartheta_{\text{bel}}$  der Beleuchtungsstrahlen bezüglich der optischen Achse und dem Sinus des maximalen Akzeptanzwinkel  $\vartheta_{\text{in}}$  der Abbildungsoptik 21 angibt. Der maximale Aperturwinkel der Abbildungsoptik kann auch durch die eingangsseitige numerische Apertur der Abbildungsoptik  $NA_{\text{EIN}} = \sin \vartheta_{\text{in}}$  beschrieben werden. Der Sinus des maximalen Winkels der Beleuchtungsstrahlen bezüglich der optischen Achse wird durch die numerische Apertur  $NA_{\text{bel}} = \sin \vartheta_{\text{bel}}$  beschrieben, die im vorliegenden Beispiel exemplarisch durch die Blende 40 in der

Ebene 4 eingestellt werden kann, so dass gilt  $\sigma = NA_{\text{bel}} / NA_{\text{EIN}}$ . Für EUV-Systeme ist typischerweise  $\sigma = 0.5 - 0.8$ , wobei der  $\sigma$ -Wert durch beispielsweise eine variable oder austauschbare Blende 40 geändert werden kann, mit einer  $\sigma$ -Variation über das Feld von beispielsweise über 10%. Um immer kleinere Strukturbreiten bei geringer Variation der Strukturbreiten über das Bildfeld zu erhalten, ist es erforderlich, daß die  $\sigma$ -Variation wesentlich geringer ist, beispielsweise weniger als 2%. Um die große  $\sigma$ -Variation von 10% zu beheben, ist es also nötig, dass die Kondensoroptik 5 hinter dem Wabenkondensor oder Diffusor 3 sehr gut sinus-korrigiert ist, d.h. der Sinusbedingung folgt.

Dieser Sachverhalt ist in Fig. 2 schematisch veranschaulicht. Gleiche Bauteile sind mit denselben Bezugsziffern wie in Figur 1 belegt. In Figur 2 erfüllt die Kondensoroptik 5, die im Allgemeinen eine Vielzahl von Linsen oder Spiegeln, auch asphärischer Form, umfassen kann, nicht die Sinusbedingung. Das einen Feldpunkt 7.1 auf der optischen Achse 17 durchdringende Beleuchtungsstrahlenbüschel 12.1 spannt einen Öffnungswinkel  $a_1$  auf, der ungleich ist einem Öffnungswinkel  $a_2$  eines Beleuchtungsstrahlenbüschels 12.2 zu einem achsfernen Feldpunkt 7.2. Die Sigma-Werte  $\sigma_1 = \sin a_1 / NA_{\text{EIN}}$  und  $\sigma_2 = \sin a_2 / NA_{\text{EIN}}$  unterscheiden sich damit, und es kommt zu einer  $\sigma$ -Variation über das Feld. Der Schwerstrahl des Beleuchtungsstrahlbüschels 12.1 ist mit 14.1, der Schwerstrahl des Beleuchtungsstrahlbüschels 12.2 zum Feldpunkt mit 14.2 bezeichnet. In Figur 2 des weiteren eingezeichnet ist die Ebene 4, die im oder in der Nähe einer konjugierten Pupillenebene liegt sowie der Strahlwinkel  $\delta$  in der konjugierten Pupillenebene und die Strahlhöhe  $x$  in der Feldebene 9 für einen achsfernen Feldpunkt als Feldrandpunkt mit maximaler Höhe in x-Richtung.

In Figur 3 ist die Kondensoroptik 5, die im Allgemeinen eine Vielzahl von Linsen oder Spiegeln, auch asphärischer Form, umfassen kann, so optimiert, dass sie die Sinusbedingung erfüllt. Damit spannt das einen Feldpunkt 7.1 auf der optischen Achse 17 durchdringende Beleuchtungsstrahlenbüschel 12.1 einen Öffnungswinkel  $a_1$  auf, der gleich ist einem Öffnungswinkel  $a_2 = a_1$  eines

5 Beleuchtungsstrahlenbüschels 12.3 zu einem achsfernen Feldpunkt 7.2. In vorliegender Figur 3 ist dabei der achsferne Feldpunkt 7.2 als ein Feldrandpunkt mit maximaler Feldhöhe in x-Richtung des auszuleuchtenden Feldes 7 in der Feldebene 9 eingezeichnet, so dass die Strahlen, welche durch diesen Feldpunkt  
10 gehen, hinter dem Wabenkondensor bzw. Diffusor, also in der Ebene 4, alle den Aperturwinkel  $b$  relativ zur optischen Achse haben. Die x-Richtung bezeichnet dabei die Richtung, die, falls die Erfindung in einer scannenden Projektionsbelichtungsanlage zum Einsatz kommt, senkrecht auf der Scanrichtung steht. Dies ist beispielsweise in Figur 8 gezeigt. Wieder eingezeichnet ist die Strahlhöhe  $x$  in der Feldebene 9 für einen achsfernen Feldpunkt.

15 Andererseits wird mit einer sinus-korrigierten Optik die Homogenität in der auszuleuchtenden Feldebene beeinträchtigt, da eine sinus-korrigierte Optik nur mit einer Lambert'schen Abstrahlungscharakteristik 11 der sekundären Lichtquelle zu einer homogenen Feldausleuchtung führt. Bei anderer Abstrahlcharakteristik ist zwar möglich, über eine gezielte Abweichung von der Sinus-Korrektur die Homogenität der Ausleuchtung in einer Ebene zu steuern und damit zu optimieren, wie beispielsweise in der DE 101 38 313 A1 oder der US-Anmeldung 10/216,547, eingereicht beim US Patent- und Markenamt am 09.08.2002, deren  
20 Offenbarungsgehalt vollumfänglich in die vorliegende Anmeldung mitaufgenommen wird, offenbart. Diese Homogenisierung der Ausleuchtung führt aber im Allgemeinen zu oben beschriebener  $\sigma$ -Variation über das Feld.

25 Die Bedingung, dass eine homogenisierte Ausleuchtung bei einer Kondensoroptik nur in Verbindung mit einem Lambert-Strahler erfolgt, gilt streng genommen natürlich nur unter Vernachlässigung von Reflexions- und Transmissionsverlusten. Im Realfall kann die ideal erwünschte Abstrahlungscharakteristik des Diffusors oder Wabenkondensors 3 durch beispielsweise rückwärtige Strahlverfolgung aus der Bildebene 19 numerisch berechnet werden. Derartige numerische  
30 Berechnungen liegen im Bereich des fachmännischen Könnens.

In einer ersten Ausgestaltung ist somit der Diffusor oder Wabenkondensor 3 so auszulegen, dass in der Ebene 4 hinter dem entsprechendem Element 3 eine Abstrahlcharakteristik ausgebildet wird, welche – unter Berücksichtigung etwaiger Transmissions bzw. Reflexionsverluste - einem Lambertstrahler oder  
5 entsprechende Abstrahlcharakteristik entspricht, so dass in Verbindung mit der sinuskorrigierten Optik sich eine homogene Feldausleuchtung bei feldunabhängigem  $\sigma$ -Wert einstellt. Hierfür könnten der Wabenkondensor durch beispielsweise asphärische Flächen entsprechend korrigiert werden. Dies ist jedoch sehr aufwendig in der Fertigung, die Herstellung ist aufgrund der kleinen  
10 Abmessungen der einzelnen Wabenkondensor-Elemente von weniger Millimetern nur sehr schwer mit ausreichender Genauigkeit möglich.

Auch Diffusoren mit komplexer, kontrollierter Abstrahlcharakteristik, so dass sie ein vordefiniertes Feld ausleuchten, bestehen – ähnlich wie Wabenkondensoren –  
15 in der Regel aus einzelnen, im Wesentlichen identischen, sich wiederholenden Zellen. Auch diese Elemente könnten entsprechend korrigiert werden, jedoch ist es auch hier schwierig aufgrund von Fertigungsfehlern sowie der Fertigung selbst, eine gewünschte Abstrahlcharakteristik genau genug einzustellen, wie es für die Projektionslithographie erforderlich ist.

Auch ist die Einstellung der Ausleuchtung der Ebene 4 rein durch optische Mittel wie Asphären oder entsprechende Elemente, so dass sich eine gewünschte Abstrahlcharakteristik in Ebene 4 einstellt, ist sehr schwierig, da fehlerempfindlich.  
20 Eine Änderung der auf den Diffusor bzw. Wabenkondensor 3 auftreffende Strahlung 1, beispielsweise im Einfallswinkel oder in der Intensitätsverteilung, führt bei festen, unflexiblen optischen Mitteln zu einer Abweichung vom gewünschten Resultat, d.h. homogener Ausleuchtung bei gleichbleibendem  $\sigma$ -Wert über der  
25 Auszuleuchtenden Feldebene 9 bzw. dem Bildfeld 19.

Bevorzugt ist daher, eine Ausgestaltung der Erfindung, bei der der  
30 Wabenkondensor bzw. der Diffusor 3 einfach gestaltet ist unter Inkaufnahme von

Fehlern. Diese Fehler werden mit separaten Korrektionelementen, welche optional sogar an die jeweilig vorliegende Optik mit ihren Fertigungsfehlern und die einfallende Strahlcharakteristik 1 angepasst werden können, so korrigiert, dass sich die gewünschte Ausleuchtung einstellt.

Liegt in der konjugierten Pupillenebene, in der die sekundären Lichtquellen ausgebildet werden, die erforderliche Winkelverteilung eines Lambert-Strahlers nicht vor, so kann sie durch ein Korrektionelement, beispielsweise ein Filterelement 23, gemäß der Erfindung eingestellt werden, wie in Figur 4 dargestellt. In den nachfolgenden Figuren tragen gleiche Bauteile wie in Figur 1 dieselben Bezugsziffern.

Das Filterelement 23 befindet sich vorzugsweise nicht exakt in der konjugierten Pupillenebene 4, in der die sekundären Lichtquellen oder die Endfläche des Diffusors oder des Wabenkondensors 3 zum Liegen kommen, sondern in einer gewissen Entfernung dazu. Wie in Figur 5 gezeigt, liegt das Filterelement 23 vorteilhafterweise soweit entfernt, dass sich die einzelnen Lichtbüschel 27.1 und 27.2 bzw. Lichtflüsse, die beispielsweise von den unterschiedlichen zweiten Rasterelementen herrühren, noch nicht überlappen. Damit kann ein divergentes Lichtbüschel, wie es an jedem zweiten Rasterelement bzw. an jeder Pupillenwabe der Pupillenwabenplatte 3.1 vorliegt, in hinreichender Entfernung zum Fokuspunkt der sekundären Lichtquelle, beispielsweise durch einen Graufilter so beeinflusst werden, dass sich eine bestimmte Winkelverteilung der Strahlung ergibt. Die Winkelverteilung wird dabei so beeinflusst, dass sich abhängig vom eingestellten Setting eine möglichst homogene Ausleuchtung des auszuleuchtenden Feldes in der Feldebene 9 ergibt, wobei gleichzeitig die Telezentrieanforderungen erfüllt werden.

Unter Telezentrieanforderung versteht man die Anforderung an den Schwerstrahl der Beleuchtung an jedem Feldpunkt in dem ausgeleuchteten Bereich 7 der Feldebene 9. Der Schwerstrahl ist dabei das energetische Mittel über alle Beleuchtungsstrahlen, welche durch einen Feldpunkt gehen. Im allgemeinen



wünscht man sich für die Projektionslithographie einen telezentrischen Strahlengang in der Ebene des zu belichtenden Substrates, d.h. in der Bildebene 19, damit sich bei Defokussierung des zu belichtenden Substrates keine Verzeichnungsfehler einstellen. Das heißt, das in der Bildebene die Schwerstrahlen eines Lichtbündels, welches einen Bildpunkt durchstößt, weitgehend parallel zur optischen Achse verlaufen soll, wobei die Abweichung beispielsweise weniger als 10 mrad beträgt. Damit die Schwerstrahlen in der Bildebene telezentrisch verlaufen, müssen sie in der Feldebene auf entsprechende Winkel eingestellt werden, welche durch rückwärtige Strahlverfolgung der Strahlenbündel durch das Projektionsobjektiv 21 leicht gefunden werden können. Damit ergibt sich ein spezifischer Verlauf der Winkel der Schwerstrahlen in der Feldebene 9, welcher durch das Beleuchtungssystem erzeugt werden muss. Vereinfacht ist in den Figuren 1 – 3 immer ein telezentrischer Verlauf auch in der Feldebene angenommen, d.h. auch in der Feldebene verlaufen alle Schwerstrahlen sämtlicher Beleuchtungskegel, die in den Figuren 1 und 2 auch als Beleuchtungsstrahlbündel bezeichnet werden, zu zugeordneten Feldpunkten parallel zur optischen Achse.

Mit dem Filterelement 23 wird nun die Abstrahlcharakteristik des optischen Integrators beeinflusst. Im Falle eines Wabenkondensors mit zwei facettierten optischen Elementen, einem so genannten ersten und zweiten Rasterelement, als optischen Integrator muss das Filterelement hierfür nicht unbedingt hinter dem zweiten optischen Element mit zweiten Rasterelementen angeordnet sein, es kann auch zwischen erstem optischen Element mit ersten Rasterelementen und dem zweiten optischen Element mit Rasterelementen oder vor dem ersten optischen Element mit Rasterelementen angeordnet sein. Figur 6 zeigt die Anordnung zwischen Feldwaben 3.3 und Pupillenwaben 3.1 eines optischen Integrators, bestehend aus einem ersten optischen Element 3.3 mit ersten Rasterelementen, so genannten Feldwaben 3.3.1, und einem zweiten optischen Element 3.1 mit zweiten Rasterelementen, so genannten Pupillenwaben 3.1.1. Die Lichtbündel, die von jeder einzelnen Feldwabe 3.3.1 ausgehen, sind mit 29.1, 29.2 bezeichnet. In oder nahe der Ebene, in der das zweite optische Element mit Rasterelementen

angeordnet ist, werden sekundäre Lichtquellen 30.1, 30.2 ausgebildet. Falls das Filterelement 23 zwischen erstem 3.3 und zweitem optischen Element 3.1 angeordnet wird, sind diese zueinander beabstandet. Figur 7 zeigt die Anordnung des Filterelementes 23 im Lichtweg von der nicht dargestellten Lichtquelle vor dem ersten optischen Element 3.3 mit ersten Rasterelementen, d.h. den Feldwaben.

Falls eine scannende Belichtung, beispielsweise mit einer Projektionsbelichtungsanlage vorgenommen wird, ist es ausreichend für die Uniformität der Ausleuchtung, wenn die in Scanrichtung integrierte Intensität weitgehend homogen ist. Unter weitgehend homogen werden in dieser Anmeldung Abweichungen von der perfekt homogenen Ausleuchtung von weniger als beispielsweise 0,5% verstanden. Damit ist es beispielsweise auch möglich, direkt vor den Feldwaben die effektive Ausdehnung der Feldwaben in Scanrichtung so zu maskieren oder zu beeinflussen, dass sich die gewünschte scan-integrierte Intensität einstellt.

Zur Berechnung der Uniformität in Scanrichtung wird von einer Ausleuchtung der Feldebene beispielsweise in der Form eines Ringfeldsegments ausgegangen, wobei die Scanrichtung parallel zur y-Richtung des Koordinatensystems verläuft. Ein solches Ringfeld und die zugehörigen Koordinaten, die die x-Richtung und die y-Richtung definieren, ist in Figur 8A dargestellt. Die Scanenergie (SE) in Abhängigkeit der zur Scanrichtung senkrechten Richtung x berechnet sich wie folgt:

$$SE(x) = \int E(x, y) dy$$

wobei E in Abhängigkeit von x und y die Intensitätsverteilung in der xy-Feldebene ist. Will man nun eine gleichmäßige Belichtung erhalten, so ist es vorteilhaft, wenn die Scanenergie weitgehend unabhängig von der x-Position ist. Die Uniformität in Scanrichtung ist demgemäß wie folgt definiert:

$$\text{Uniformität [\%]} = 100\% * (SE_{\max} - SE_{\min}) / (SE_{\max} + SE_{\min})$$

Dabei ist  $SE_{\max}$  die maximal und  $SE_{\min}$  die minimal auftretende Scanenergie im ausgeleuchteten Feldbereich. Im Figur 8B ist stark übertrieben ein Verlauf des scanintegrierten Uniformitätsverlauf mit  $SE_{\min}$  und  $SE_{\max}$  in x-Richtung dargestellt.

Wie zuvor ausgeführt, kann in Ebenen zwischen den exakten Lichtquellenbildern in oder in der Nähe der Pupillenwabenplatte 3.1 und bis zu den Ebenen, in denen die Lichtbüschel 27.1 und 27.2 von den einzelnen Pupillenwaben 3.1.1 sich zu überlappen beginnen, die Abstrahlungscharakteristik ortsabhängig korrigiert werden und damit die Abstrahlungscharakteristik gezielt beeinflusst werden. Das Filter 25 mit einer Vielzahl von Filterelementen 23, die jedem Kanal, d.h. jeder sekundären Lichtquelle bei einem Wabenkondensor und damit jeder Pupillenwabe bzw. zweitem Rasterelement zugeordnet ist, kann wie zuvor beschrieben beispielsweise nahe vor den Feldwaben des ersten optischen Elementes 3.3 zwischen den Feldwaben und bis in die Nähe der Pupillenwaben des zweiten optischen Elementes 3.1, oder etwas entfernt hinter den Pupillenwaben angeordnet werden. Bei einem refraktiven Wabenkondensor wird der Filter vorteilhafterweise vor den Feldwaben oder etwas beabstandet hinter den Pupillenwaben angebracht. Bei einem reflektiven Wabenkondensor wird der Filter vorteilhafterweise im Lichtweg von der nicht dargestellten Lichtquelle nach den Feldwaben angeordnet, so dass er auf zweifache Weise wirkt, nämlich im einfallenden und reflektierten Strahlengang. Dies hat den Vorteil, dass sich dort die den einzelnen Wabenkanälen zugeordneten Lichtbüschel 29.1, 29.2, 27.1, 27.2, die zwischen den Feldwaben des ersten optischen Elementes 3.3 und den Pupillenwaben des zweiten optischen Elementes 3.1 ausgebildet werden und nach dem Pupillenwaben des zweiten optischen Elementes 3.1, nicht überlappen und somit eine gezielte Steuerung der Abstrahlcharakteristik dort optimal erreicht werden kann.

Wenn das Abbildungssetting, d.h. der Kohärenzgrad  $\sigma$  der Abbildung geändert wird, was bedeutet, dass die Ausleuchtung der Austrittspupille des

Beleuchtungssystems geändert wird, kann es zur Erzeugung einer homogenen Ausleuchtung erforderlich sein, dass das Filter angepasst wird. Hierzu ist es vorteilhaft, wenn mehrere Filter für bestimmte Settings über einen Wechsler verfügbar gemacht werden. Die Filter können an eine jeweilige

5 Beleuchtungseinrichtung angepasst werden, d.h. individuell beispielsweise auch an Fertigungstoleranzen eines Wabenkondensors oder der Antireflexbeschichtung bzw. eines Multilayer-Coatings angepasst werden. Stellt man beispielsweise nach der Montage des Beleuchtungssystems fest, dass die Ausleuchtung in der Feldebene von der gewünschten und durch Berechnungen vorhergesagten

10 Homogenität abweicht, kann durch den erfindungsgemäßen Filter die gewünschte Homogenität nachträglich durch Korrektur bzw. entsprechende Anpassung des Filterelementes eingestellt werden. Hierzu geht man von der gemessenen Homogenitätsverteilung aus, und bestimmt an den Stellen des Filters, die zur Ausleuchtung eines beispielsweise überstrahlten Feldpunktes konjugiert sind, eine

15 entsprechend höhere Dichte des Transmissionsfilters.

Über den Austausch der Filter ist es im Prinzip auch möglich, verschiedene Settings direkt einzustellen. Dies ist dann allerdings mit Lichtverlust verbunden.

20 Figur 9 zeigt das Beispiel eines Filters 25 für ein bestimmtes Beleuchtungssetting, beispielsweise ein konventionelles Setting, mit mehreren Filterelementen 23.1, 23.2, 23.3, 23.4 für eine Anordnung hinter den Pupillenwaben. Exemplarisch sind vier rechteckige Bereiche für vier Kanäle eines Wabenkondensors gezeigt, in denen ein rotationssymmetrischer Transmissionsverlauf eingestellt ist. Die

25 Transmission ist beispielsweise über eine Chrombeschichtung entweder mit variabler Dicke oder – wie dargestellt - gerastert - ähnlich der Drucktechnik – variabel gestaltet. Jedes Segment der auszugsweise gezeigten vier Segmente entspricht einem Wabenkanal oder Lichtkanal bzw. einem Lichtbüschel 27.1, 27.2, das von einer sekundären Lichtquelle 30.1, 30.2, die beispielsweise von einem

30 ersten optischen Element mit Rasterelementen ausgebildet wird, ausgeht. Der Filter besteht im Wesentlichen aus gleichen Filterelementen für die vier gezeigten Wabenkanäle, und wäre bevorzugt geeignet, eine designbedingte große

Abweichung von der Lambertcharakteristik zu korrigieren. Designfehler sind Fehler, die man beispielsweise dadurch erhält, dass man die einzelnen Wabenlinsen oder Spiegel fertigungsbedingt nicht asphärisch, sondern sphärisch auslegt oder die optischen Flächen aller Kanäle gleich gestaltet, und auf eine Optimierung der einzelnen Kanäle verzichtet.

Figur 10 zeigt dagegen ein Beispiel eines Filters für einen Wabenkanal, der ortsabhängig beispielsweise Fertigungsfehler eines einzelnen Wabenkanals korrigiert, so dass sich eine homogene Ausleuchtung des Feldes 7 in der Feldebene 9 für diesen Wabenkanal einstellt. Fertigungsfehler können beispielsweise Oberflächenformfehler, Fehler der Beschichtung, Justagefehler und Abweichungen von der idealen geometrischen Form beispielsweise der Feldwaben sein. Ein solches Filter könnte beispielsweise nachträglich aus dem gemessenen Uniformitätsfehler in der Feldebene 9 oder in der Bildebene 19 berechnet und in das Beleuchtungssystem eingebracht werden. Dieser Filter, der im Wesentlichen Fertigungsfehler korrigiert, kann auch mit dem oben gezeigten Filter, der Designfehler korrigiert, kombiniert werden, so dass nur ein Filter eingesetzt werden muss. Für jeden Wabenkanal kann sich dabei beispielsweise durch Fertigungstoleranzen bedingt ein unterschiedlicher Verlauf des Korrekturfilterelementes in Figur 10 ergeben. Die Transmission ist beispielsweise über eine Chrombeschichtung entweder mit variabler Dicke oder – wie dargestellt – gerastert – ähnlich der Drucktechnik, variabel gestaltbar.

Figur 11 zeigt einen Filter für ein beliebiges Setting, das vor dem ersten optischen Element 3.3 mit Feldwaben angeordnet ist. Exemplarisch gezeigt ist der Filter mit sechs Filterelementen für sechs Wabenkanäle, d.h. sechs durch den optischen Integrator zur Verfügung gestellte Lichtkanäle, deren Ausdehnung in Scanrichtung durch die Blenden variiert werden. Dargestellt sind exemplarisch die unterschiedlichen Blenden 43.1 und 43.2 für die Feldwaben 41.1 und 41.2. Es ist nicht erforderlich, dass vor allen Feldwaben ein erfindungsgemäßes Filterelement angebracht wird, in der Regel reicht eine geringere Anzahl von Filterelementen, um die geforderte Uniformitätsfehlerkorrektur zu erreichen. Liegt durch

Abweichung von der Lambert-Charakteristik beispielsweise ein Uniformitäts-Fehler von 10% vor, so reicht es aus, 40 von 100 Wabenkanälen selektiv, d.h. feldhöhenabhängig, etwa zu einem Viertel abzuschatten, um auf weniger als 0.5% Uniformitätsfehler der scanintegrierten Uniformität zu kommen. Wie aus Figur 11 deutlich hervorgeht wird durch das Filterelement des jeweiligen Waben- beziehungsweise Lichtkanales die Intensität des Lichtes des Lichtkanales nach dem Filterelement durch beispielsweise die eingebrachten Blenden 43.1, 43.2 abgeschwächt. Diese Abschwächung des Lichtes erfolgt ortsabhängig, d.h. das Licht des Lichtkanales, das eine Fläche des Filterelementes ausleuchtet, wird an unterschiedlichen Stellen dieser ausgeleuchteten Fläche unterschiedlich stark abgeschwächt, beispielsweise im Bereich der Blenden vollständig und an Stellen an denen keine Blenden im Lichtkanal vorgesehen sind nicht. Die Abschwächung ist also ortsabhängig. Bei einem transmissiven Filterelement, beispielsweise einem Graufilter wie in Figur 9 oder 10 gezeigt, kann die Transmission und damit die Abschwächung variabel in einem Bereich von 0% Abschwächung bis 100 % Abschwächung ortsabhängig eingestellt werden.

Statt Blenden, die nach Abbildung des transmittierten Strahlungsflusses in die Feldebene 9, des ausgeleuchteten Bereiches 7, beispielsweise eines Ringfeldes, wie in Fig. 8A gezeigt, in Scanrichtung, d.h. in y-Richtung, die scan-integrierte Uniformität der Ausleuchtung korrigieren, ist es auch möglich, ein Filter mit Filterelementen anzubringen, das über die Transmission die Homogenität der Ausleuchtung, beispielsweise eines Ringfeldes in der Feldebene 9 korrigiert. Blenden wären die bevorzugte Lösung bei Spiegelsystemen, wie sie beispielsweise bei EUV eingesetzt werden, transmissive Filterelemente sind eine bevorzugte Option bei längeren Wellenlängen, beispielsweise 157 nm oder 193 nm.

In den Figuren 9 und 10 ist ein Beispiel für ein Filter mit transmissiven Filterelementen, Figur 11 ist ein Beispiel für ein aus Filterelementen mit Blenden aufgebautes Filter. Wie aus der Beschreibung zu Figur 11 hervorgeht, ist es für die

Erzielung einer ausreichenden scan-integrierten Homogenität der Ausleuchtung ausreichend, Blenden lediglich vor den Feldwaben anzubringen.

Während bislang Filterelemente beschrieben wurden, die statisch ausgelegt sind, d.h. die Filterelemente wurden so ausgelegt, dass sie beispielsweise Fertigungsfehler korrigieren, ist die Erfindung hierauf nicht beschränkt.

Denkbar wären auch aktive Filterelemente, die beispielsweise zusätzlich zu den statischen Filterelementen eingebracht werden können. Derartige aktive Filterelemente umfassen eine aktive Komponente mit der beispielsweise aus einem Wabenkanal, der zwischen dem ersten Rasterelement und dem zweiten Rasterelement ausgebildet wird, die Lichtintensität verringert werden kann, beispielsweise bis zur vollständigen Abschattung. Von Vorteil sind derartige aktive Komponenten die zum Beispiel derart ausgelegt sind, dass an den Rändern der einzelnen ersten optischen Rasterelementen, die auch als Feldwaben bezeichnet werden die Lichtintensität variabel vermindert wird, um beispielsweise typischerweise auftretende Überhöhungen der Bestrahlungsstärke in der auszuleuchtenden Ebene, der sogenannten Feldebene zu verringern beziehungsweise ganz zu vermeiden. Als aktive Komponente eines derartigen aktiven Filterelementes sind beispielsweise Elemente, die Abschattungen erzeugen, wie verfahrbare oder in ihrer Dicke variierbare Drähte denkbar. Auch in den Strahlengang drehbare Kammblenden oder elektrooptische Komponenten mit variabler Transmission beziehungsweise Reflexion wären denkbar.

Mit beispielsweise hinter den zweiten optischen Rasterelementen, den Pupillenwaben, in Richtung der optischen Achse verfahrbaren Transmissionsfilterelementen kann ebenso die Uniformität der Ausleuchtung in der Feldebene variabel korrigiert werden, wenn es vorwiegend zu einer Überhöhung der Ausleuchtung am Feldrand kommt. Der Filter ähnlich dem Filter aus Fig. 9 wird hierzu in das divergente Strahlenbüschel in z-Richtung so verfahren, dass er entweder nahe an den Pupillenwaben sitzt und die Strahlenbüschel nur durch den mittleren Bereich der Filterelemente 23.1 bis 23.4 praktisch ungehindert passieren

kann, oder in einer Entfernung beabstandet, so dass die Strahlenbündel hinter den sekundären Lichtquellen sich hinreichend weit aufgeweitet haben, und am Rand durch die Filterelemente 23.1 – 23.4 gezielt abgeschwächt werden.

5      Figur 12 zeigt ein Beispiel einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage, wie sie beispielsweise in der PCT/EP/02/00608 gezeigt ist, deren Offenbarungsgehalt in die vorliegende Anmeldung vollumfänglich miteingeschlossen ist.

10      Die EUV-Projektionsbelichtungsanlage gemäß Figur 20 umfasst ein Beleuchtungssystem 206 mit einem diffraktiven Spektralfilter 200, der beispielsweise durch ein Gitter realisiert ist. Zusammen mit der Blende 202 in der Nähe des Zwischenbildes Z der Lichtquelle 201 kann damit ungewünschte Strahlung mit beispielsweise Wellenlängen wesentlich größer als der gewünschten Wellenlänge, im vorliegenden Fall 13,5 nm, vom Eintritt in den Teil des hinter der  
15      Blende 202 liegenden Beleuchtungssystems abgehalten werden.

Die Blende 202 kann auch dazu dienen, den Raum 204 umfassende Lichtquelle 1, einen Kollektor 203 sowie das Gitter 200 vom nachfolgenden Beleuchtungssystem 206 räumlich zu trennen. Werden beide Räume durch das  
20      Einbringen eines Ventiles nahe des Zwischenfokus Z getrennt, so ist auch eine durchmäßige Trennung möglich. Durch eine räumliche bzw. eine druckmäßige Trennung kann verhindert werden, dass Verschmutzungen, die von der Lichtquelle herrühren, in das hinter der Blende 202 liegende Beleuchtungssystem gelangen.

25      Das in Figur 12 gezeigte Beleuchtungssystem umfasst einen genesteten Kollektor 203 mit beispielsweise acht Schalen. Das erste optische Element 102 umfasst 122 erste Rasterelemente mit einer Ausdehnung von jeweils 54 mm x 2,75 mm. Das zweite optische Element 104 weist wenigstens 122 den ersten Rasterelementen zugeordnete zweite Rasterelemente mit einem Durchmesser von jeweils 10 mm  
30      auf. Das erfindungsgemäße Korrektionelement ist mit 1000 bezeichnet und direkt vor den ersten Rasterelementen 102 angeordnet. Das Korrektionelement befindet sich zum Austausch beispielsweise in einem um eine Rotationsachse



1010 verdrehbaren Filterrad mit anderen Korrektionelementen 1002 für beispielsweise andere Abbildungssettings. Auch die Ausbildung als Filterelement mit einer aktiven Komponente, wie oben beschrieben, ist denkbar. In der dargestellten Ausführungsform ist das Korrektionelement 1000 vor dem ersten optischen Element mit Rasterelementen angeordnet. Dies ist vorteilhaft, aber keineswegs zwingend. Auch Anordnungen nach dem zweiten optischen Element 104 mit Rasterelementen oder zwischen erstem und zweitem optischen Element 102, 104 mit ersten bzw. zweiten Rasterelementen wäre möglich. Bei reflektiven Systemen, wie in Fig. 12 dargestellt, ist jedoch eine Anbringung des Filterelementes in direkter Nähe zu den Facettenspiegeln 102 oder 104 vorteilhaft.

Die zweiten Rasterelemente des zweiten optischen Elementes 104 werden über die Spiegel 106, 108 und 110 in die Eintrittspupille E des nachfolgenden Projektionsobjektives 126 mit sechs Spiegeln 128.1, 128.2, 128.3, 128.4, 128.5, 128.6 abgebildet. Das Projektionsobjektiv 126 bildet das Ringfeld in der Objektebene 114 in ein Bildfeld in einer Bildebene 124 ab, in der sich das zu belichtende Objekt befindet. Die strukturtragende Maske ist in der Objektebene 114 angeordnet.

Der feldformende Spiegel 110 des Beleuchtungssystems zur Formung des Ringfeldes in der Objektebene 114 besteht aus einem außeraxialen Segment eines Rotationshyperboloids.

Das in Figur 12 gezeigte System ist für einen Feldradius von  $R = 130$  mm bei einer Beleuchtungsapertur von  $NA = 0,03125$  in der Objektebene 114, d.h. am Retikel ausgelegt, entsprechend einem Füllgrad von  $\sigma = 0,5$  in der Eintrittspupille E eines nachfolgenden 4:1-Projektionsobjektives mit einer Apertur  $NA = 0,25$  in der Ebene 124 des zu belichtenden Objekts.

Während die in Figur 12 gezeigte Projektionsbelichtungsanlage die Feldwaben des ersten optischen Elementes direkt in die Feldebene abbildet, in der das auszuleuchtende Objekt, beispielsweise das Retikel angeordnet ist, sind auch

Projektionsbelichtungsanlagen möglich, bei der die ersten Rasterelemente, die auch als Feldwaben bezeichnet werden zunächst ein Zwischenbild abgebildet werden und mit einer im Strahlengang nachfolgenden Optik dann in die Feldebene, in der das Retikel angeordnet ist. Ein derartiges Beleuchtungssystem ist aus der WO 01/09681 bekanntgeworden, deren Offenbarungsgehalt vollumfänglich in die vorliegende Anmeldung miteingeschlossen wird.

Fig. 13 zeigt das auszuleuchtende Feld 7 in der Feldebene 9 bzw. 114 einer scannenden Projektionsbelichtungsanlage wie in Figur 12 gezeigt. Scan-Richtung ist die y-Richtung. Die in y-Richtung integrierte Intensität  $SE(x) = \int SE(x, y) dy$  über das Feld entspricht der scan-integrierten Intensität. Für eine Feldhöhe  $x_1$  ist eine Linie 250 in Scanrichtung dargestellt. Will man für diese Feldhöhe  $x_1$  die scan-integrierte Intensität  $SE(x_1)$  verringern, so muss man an den Feldwaben auf den konjugierten Scanwegen die transmittierte Leistung durch den erfindungsgemäßen Filter verringern, so dass sich eine gewünschte scan-integrierte Intensität  $SE(x_1)$  einstellt. Für eine Feldwabe, die in die Feldebene 9 bzw. 114 abgebildet wird, ist in Figur 14 der konjugierte Scanweg für die in Figur 13 ausgewählte Feldhöhe  $x_1$  dargestellt. Die scan-integrierte Intensität  $SE(x_1)$  kann man beispielsweise durch eine geeignet gestaltete Blende verringern, um die scan-integrierte Lichtleistung zu verringern und damit einen Homogenitätsfehler zu korrigieren. Die Gestalt der Blende entlang der konjugierten Scanrichtung 260 auf der Feldwabe, wie in Figur 14 dargestellt, bestimmt die Ausleuchtung der Feldebene in Scanrichtung 250 für einen Kanal 27.1, 29.1, beispielsweise eines doppeltfacettierten Beleuchtungssystems mit einem ersten und einem zweiten facettierten optischen Element. Liegt ein optisches System mit beispielsweise 122 Feldwaben, d.h. beispielsweise 122 Kanäle, vor, so kann über eine Blende an einer Feldwabe nur maximal etwa 1% der scan-integrierten Uniformität korrigiert werden. Hierzu müsste jedoch die komplette Feldwabe abgeblendet werden. Dies hätte aber Einfluss auf das Beleuchtungssetting. Es ist daher vorteilhaft, die Korrektur der scan-integrierten Uniformität gleichmäßig über viele Feldwaben zu verteilen, deren zugeordnete Pupillenwaben möglichst symmetrisch die

Austrittspupille ausleuchten, so dass sich durch den Filter keine Einfluss auf den Schwerstrahl der Ausleuchtung bzw. die Telezentrie in der Bildebene 17 ergibt.

Figur 15 zeigt ein Beispiel einer scan-integrierten Intensität  $SE(x)$  in Abhängigkeit von der Feldhöhe  $x$  für eine EUV-Belichtungsvorrichtung gemäß Figur 12. Die minimale scan-integrierte Intensität  $SE_{min}$  beträgt 97.7 %, die maximale  $SE_{max}$  104.6% innerhalb des auszuleuchtenden Feldes bis zu einer Höhe von  $x = \pm 52\text{mm}$ . Der Uniformitätsfehler ist hierfür  $\Delta SE = (SE_{max} - SE_{min}) / (SE_{max} + SE_{min}) \approx 3.4\%$ .

Figur 16 zeigt die Uniformität in der Feldebene, die bei Verwendung eines Filters mit Filterelementen vor den Feldwaben erreicht wird. Der Uniformitätsfehler ist durch das erfindungsgemäße Filter auf besser als 0.5% korrigiert, ohne dass dadurch die Telezentrie- Eigenschaften des Beleuchtungssettings beeinflusst werden. Das Filter hat in diesem Beispiel dabei die Gestalt des in Figur 11 gezeigten Filters mit Filterelementen mit Blenden, welche vor den Feldwaben angeordnet wurden. Hierfür wurde in der Bildebene 17 bzw. 124 zunächst die Homogenität der Ausleuchtung ohne Filter bestimmt. Nachfolgend wurden 28 der 122 Feldwaben ausgewählt, und für diese nach der in Figuren 13 und 14 gezeigten Weise der entsprechende Blendenverlauf zur Beschneidung der Ausleuchtung in der Bildebene bestimmt, wobei die auf die Wabenplatte einfallende Verlauf der Bestrahlungsstärke durch die Quelle und vorgeschaltete Kollektoroptik berücksichtigt wurde. Um die 3.4% Uniformitätsfehler zu korrigieren, ist es ausreichend, von den ausgewählten 28 Feldwaben nur etwa jeweils maximal 15% der von den Feldwaben ausgeleuchteten Fläche auf den Filterelementen abzuschatten, um auf weniger als 0.5% Uniformitätsfehler zu kommen. Der Restfehler in Figur 16 bedingt sich im Wesentlichen durch die Rechengenauigkeit und kann durch Iteration des beschriebenen Vorgehens weiter reduziert werden.

Erfolgt die Feldformung für ein Ringfeld über eine optische Komponente mit einem anamorphischen Feldspiegel, beispielsweise einem feldformenden grazing-

incidence-Spiegel 110, wie beispielsweise im Ausführungsbeispiel zu Figur 12 gezeigt, so muss dafür gesorgt werden, dass es wenigstens in radialer Richtung zu keiner Verletzung der Sinusbedingung kommt. In azimuthaler Richtung muss man dafür sorgen, dass sich - für einen Feldpunkt - die konjugierte Pupillenpunkte alle um den gleichen Winkel drehen, d.h. die Pupille muss sich bei der Kondensorabbildung gleichmäßig drehen, so dass es zu keiner Ungleichmäßigkeit bei der Ausleuchtung der Pupille kommt. Dies ist in Abbildungen 17 A -B und 18 A-B dargestellt.

10 Innerhalb des Beleuchtungssystems mit Ringfeldformung über eine anamorphotische Abbildung, beispielsweise mittels eines feldformenden grazing incidence-Spiegels, gibt es keine Ebene, die zur Austrittspupille optisch exakt konjugiert ist. Ursache hierfür ist die optische Wirkung der optischen Komponente mit anamorphotischer Wirkung, beispielsweise des feldnahen grazing-incidence  
15 Spiegels 110, der zur Ringfeldformung dient. Betrachtet man einen isolierten Feldpunkt, so führt der feldnahe grazing-incidence Spiegel eine stigmatische Abbildung der sekundären Lichtquellenpunkte in der Nähe des Pupillenfacettenspiegels in die Austrittspupille des Beleuchtungssystems aus. Damit die Ausleuchtung der Pupille stationär ist, d.h. der Schwerstrahl, der  
20 Durchmesser und die Homogenität der Ausleuchtung für jeden Feldpunkt des auszuleuchtenden Feldes in der Feldebene identisch ist und sich somit beispielsweise der  $\sigma$ -Wert sich über das Feld nicht ändert, muss die Sinusbedingung in radialer Richtung (d.h. in r-Richtung in der Pupillenebene) erfüllt werden. Für unterschiedliche Feldpunkte gehen die Austrittspupillen dann  
25 durch eine einfache Drehung auseinander hervor. Wie in Fig. 17B gezeigt, ist der Drehwinkel der Pupille vorzugsweise identisch mit dem Azimutwinkel des Feldpunktes 411 in der Feldebene 400. Die in Fig. 17 A und B gezeigten Pupillenausleuchtungen 405 und 415 entsprechen einem annularen Beleuchtungssetting. Da die Pupillen für unterschiedliche Feldpunkte 401 und 411,  
30 die sich um den Winkel  $\varphi$  unterscheiden, im Wesentlichen durch Drehung um den Winkel  $\varphi$  auseinander hervorgehen, ist das Beleuchtungssetting feldunabhängig.

Die Schwerstrahlen 403 und 413 verlaufen dabei zwischen Feldpunkten 401 und 411 und den Durchstoßpunkten der z-Achse mit der Pupillenebene mit annularen Ausleuchtungen 405 und 415.

5 Durch die Erfüllung der Sinusbedingung nur in radialer Richtung (d.h. in r-Richtung in der Pupillenebene) ist damit die Uniformität in der Feldebene von der Abstrahlcharakteristik in der Pupillenwabenplatte determiniert. Liegt hier keine geeignete Abstrahlcharakteristik vor, so muss wie oben gezeigt mit einem entsprechenden Filter korrigiert werden.

10 Die Erfindung ermöglicht es auch, auf einfache Art und Weise unterschiedliche Beleuchtungseinstellungen zu realisieren.

15 Will man beispielsweise ein von der annularen Ausleuchtung abweichendes Beleuchtungssetting einstellen, wie beispielsweise Quadrupol- oder Dipolbeleuchtung, so können durch den erfindungsgemäßen Filter die nicht benötigten Subpupillen bei beispielsweise einer annularen Ausleuchtung durch geeignete Blenden in der Feldfacettenebene abgeblendet werden. Unter Subpupille wird dabei ein sekundäres Lichtquellenbild verstanden, wie es von einem einzigen Kanal des beispielsweise 122 Wabenkanäle umfassenden Wabenkondensors gebildet wird.

20 Hierzu ist gemäß Figuren 13 und 14 für jeden Kanal und jede Feldhöhe diejenige Linie auf den Feldwaben zu bestimmen, für die eine Subpupille ausgeleuchtet wird. Hierbei ist zu beachten, dass jeder Pupillenwabe ein sekundäres Lichtquellenbild entspricht. Um die entsprechende Ausleuchtung einzustellen, sind die jeweiligen nicht auszuleuchteten Bereiche dann durch entsprechende Blenden abzublenken, wobei über die Drehung der Pupille die Blenden Feldwaben nur teilweise abblenden.

25 30 In Figur 18 A und B ist der Fall einer Dipolbeleuchtung dargestellt. Die Dipolbeleuchtung kann zur Steigerung des Kontrastes und der Tiefenschärfe bei

der Abbildung eingesetzt werden. Diesbezüglich wird auf H.H. Hopkins, *On the diffraction theory theory of optical images*, Proc. Roy. Soc. London, A 217, pp. 408 – 432 (1953), (siehe dort Kapitel 3, S. 422) verwiesen. Wie in Figur 18 ersichtlich, müssen aufgrund der Drehung der Ausleuchtung der Austrittspupille feldabhängig unterschiedliche Kanäle bzw. zugeordnete Bereiche auf Feldwaben abgeblendet werden.

In Fig. 18A ist hierzu die Pupillenausleuchtung in der Feldmitte dargestellt. Zur Dipolbeleuchtung ist die Pupille nur in zwei außeraxialen Bereichen ausgeleuchtet, welche im vorliegenden Fall in x-Richtung zur optischen Achse versetzt sind. Nur die mit 407 bezeichneten Bereiche sind ausgeleuchtet.

Für den außeraxialen Feldpunkt 411 geht, wie in Figuren 17B und 18B gezeigt, die Pupille durch Drehung um den Winkel  $\varphi$  hervor. Die Dipolbeleuchtung des zentralen Feldpunktes 401, der auch als Punkt (0,0) im x-y-Koordinatensystems in der Feldebene bezeichnet wird, erscheint daher für den Feldpunkt 411 um den Winkel  $\varphi$  gedreht, wie durch die mit 419 bezeichneten Bereiche in Fig. 18B angedeutet. Die gewünschte Ausleuchtung in der Pupille zum Feldpunkt 411 entspricht jedoch der durch die Ziffer 417 bezeichneten Ausleuchtung. Durch geeignete Blenden beispielsweise vor den Feldwaben kann herbeigeführt werden, daß für den zentralen Feldpunkt die Pupillenwaben und damit Wabenkanäle entsprechend dem Bereich 409 in der Pupillenebene ausgeblendet werden, während die Kanäle, die den Bereich 407 ausleuchten, durchlässig sind, wobei für den Feldpunkt 411 gleichzeitig die Kanäle ausgeblendet werden, welche der Ausleuchtung 419 entsprechen, und diejenigen Lichtdurchlässig sind, welche dem Bereich 417 entsprechen. Dies wird Beispielhaft an einem Quadrupolsetting im Folgenden näher erläutert.

In den Figuren 19 – 23 wird am Beispiel des Quadrupolsettings beispielhaft die Bestimmung der erfindungsgemäßen Blenden zur Settingeinstellung gezeigt. Die Austrittspupille des Beleuchtungssystems, die mit der Eintrittspupille des

Projektionsobjektives zusammenfällt, soll zu jedem Feldpunkt nur in den umrandeten Bereichen 520 wie in den Figuren 20 – 23 gezeigt, ausgeleuchtet werden. Wie zuvor beschrieben dreht sich in einem EUV-System mit einem feldformenden grazing-incidence Spiegel das Bild der Pupillenwabenplatte in der Austrittspupille des Beleuchtungssystems bei der Abbildung über den feldformenden Spiegel.

In Figur 19 ist das auszuleuchtende Ringfeld 506 in der Feldebene 114 einer scannenden Projektionsbelichtungsanlage gezeigt. Eine scannende Projektionsbelichtungsanlage ist beispielsweise in Figur 12 dargestellt.

Im auszuleuchtenden Ringfeld sind insgesamt vier Feldpunkte 501.1, 502.2, 503.3 und 504.4. gezeigt.

Die zu den unterschiedlichen Feldpunkten gehörenden Austrittspupillen sind in den Figuren 20 bis 23 dargestellt. Es zeigt Figur 20 die Austrittspupille 531.1 des zentralen Feldpunktes 501.1, Figur 21 die Austrittspupille 531.2 eines um den Winkel  $\varphi$  gedrehten Feldpunktes 501.2, Figur 22 die Austrittspupille 531.3 eines Feldpunktes 501.3 am linken Feldrand und Figur 23 die Austrittspupille 531.4 eines Feldpunktes 501.4 am rechten Feldrand.

In Figur 19 sind des weiteren für das erste optische Element mit ersten Rasterelementen, dem sogenannten Feldwabenkondensor zwei erste Rasterelemente 502, 504 der beispielsweise 122 ersten Rasterelemente des Feldwabenkondensors gezeigt.

Jeder Feldwabe ist eine Pupillenwabe und damit eine Subpupille in der zum jeweiligen Feldpunkt gehörenden Austrittspupille zugeordnet. Die Subpupille des ersten Rasterelementes 502 ist mit 512 bezeichnet, die des anderen ersten Rasterelementes 504 mit 514.

Betrachtet man nun in Figur 20 die Austrittspupille 531.1, die dem zentralen Feldpunkt 501.1 des Ringfeldes 506 zugeordnet ist, so liegt die dem ersten Rasterelement 502 zugeordnete Subpupille 512 innerhalb des auszuleuchtenden Bereichs 520 der Austrittspupille 531.1. Die dem anderen ersten Rasterelement 504 zugeordnete Subpupille 514 liegt außerhalb des auszuleuchtenden Bereichs 520 der dem zentralen Feldpunkt zugeordneten Austrittspupille 531.1.

Für andere Feldpunkte des Ringfeldes 506 geht die zugeordnete Austrittspupille durch Drehung hervor. Durch die Drehung der Austrittspupille für anderen Feldpunkten drehen sich auch die einzelnen Subpupillen, die den jeweiligen Pupillenwaben zugeordnet sind. Hierdurch wandert beispielsweise die Subpupille 512 aus dem auszuleuchtenden Bereich 520 der dem jeweiligen Feldpunkt zugeordneten Austrittspupille heraus. Um dennoch für alle Feldpunkte ein Quadrupolsetting sicherzustellen, können durch eine entsprechende Blende auf der jeweiligen Feldwabe diese Bereiche mittels einer in Figur 19 dargestellten Filterblende 522, 524 abgeblendet werden. Diese Teile der Feldwabe tragen dann zur Ausleuchtung der Austrittspupille zu diesem Feldpunkt nicht bei.

Bereiche in denen eine Feldwabe vollständig abgeschattet ist, tragen zum Strahlungsfluss an dem optisch konjugierten Feldpunkt nicht bei, da für diesen Kanal der Strahlungsfluss blockiert ist. Wie in Fig. 18A-B, und 20-23 dargestellt, kann so eine strukturierte Beleuchtung realisiert werden. Durch eine keilförmige Auslegung der Filterblenden 522, 524 über den Feldwaben wird ein weicher Verlauf in der Pupille erzielt. Gleichzeitig dient dieser Verlauf dazu, Sprünge in der Uniformität der Ausleuchtung der Retikelebene zu vermeiden. Ein weicher Verlauf wird dadurch gegeben, das Subpupillen nicht schlagartig abgeschattet werden, wenn man quer zur Scanrichtung durch das Feld geht, sondern durch beispielsweise zur projizierten Scanrichtung gemäß Figur 19 abgeschrägte Blendenberandung einen Wabenkanal über einen bestimmten Feldhöhenbereich in x-Richtung langsam gleichsam aus- bzw. einblendet. Fig. 20 zeigt die Subpupillen für 107 Kanäle für die dem zentralen Feldpunkt zugeordnete



5 Austrittspupille, wobei die zu den ausgewählten Feldwaben 502, 504 zugeordneten Subpupillen mit 512, 514 bezeichnet und hervorgehoben sind. Zur Quadrupolbeleuchtung sollen nur die Subpupillen in den umrandeten Bereichen 520 der Austrittspupille 531.1 zur Ausleuchtung beitragen. Daher muss die rechte der beiden Subpupillen 514, welche der unteren der beiden ausgewählten Feldwaben 504 entspricht, durch eine lokale Blende vor der entsprechenden Feldwaben abgeschattet werden.

15 Fig. 21 zeigt die Austrittspupille 531.2 für einen Feldpunkt, der durch Drehung um den Winkel  $\varphi$ , was der Feldhöhe  $x$  entspricht, hervorgeht. Die Subpupillen sind alle um den Winkel  $\varphi$  gedreht. Jetzt muss die der unteren Feldwabe 504 zugeordnete Subpupille 514 zur Ausleuchtung beitragen, d.h. an der zugeordneten Stelle der unteren Feldwabe darf sich jetzt keine abschattende Blende befinden. Die obere Feldwabe 502 dagegen trägt mit der Subpupille 512 nur teilweise zur gewünschten Ausleuchtung bei und muss daher teilweise abgeschattet werden, um für diesen Feldpunkt 501.2 nur den umrandeten Bereich 520 auszuleuchten.

20 Fig. 22 und 23 zeigen die Austrittspupillen 531.3, 531.4 zu den Feldpunkten 501.3, 501.4 am linken Feldrand (Fig. 22) und am rechten Feldrand (Fig. 23) des in Figur 19 gezeigten Ringfeldes 506. Die Subpupillen der jeweiligen Feldwaben 502, 504 sind wiederum mit 512 und 514 bezeichnet.

25 Figur 24 zeigt eine Blende 600 vor den Feldwaben aus dem Stand der Technik, beispielsweise der WO 02/27401, deren Offenbarungsgehalt vollumfänglich in die vorliegende Anmeldung mit aufgenommen wird. Bei der Ausführungsform gemäß Figur 24 ist die Blende so angelegt, dass nur vollständig ausgeleuchtete Feldwaben in die Feldebene abgebildet werden. Insgesamt umfasst das erste optische Element beispielsweise 122 erste Rasterelemente, sogenannte  
30 Feldwaben.

Im Gegensatz zu Figur 24 zeigt Figur 25 ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Filters 602 für ein erstes optisches Element mit Feldwaben. Ist der Uniformitätsfehler bereits sehr gering, beispielsweise etwa 2 %, so kann durch Filterung an nur wenigen Wabenkanälen der kleine Uniformitätsrestfehler durch die erfindungsgemäßen Blenden 604 korrigiert werden. Im gezeigten Fallbeispiel sind nur an den acht zugänglichen Feldwaben bzw. ersten Rasterelementen 603.1, 603.2, 603.3, 603.4, 603.5, 603.6, 603.7, 603.8 am Rand der Blende 604 kleine Abschattungen 606 angebracht, welche den Uniformitätsfehler von etwa 2% auf weniger als etwa 0.5% korrigieren.

Wird statt des beschriebenen Wabenkondensors ein allgemeiner Diffusor eingesetzt, so ist der Filter in einfacher Weise übertragbar. Diffusoren weisen ähnlich wie Wabenkondensoren meist eine gerasterte Struktur auf und der Strahlungsfluss, welcher einen Feldpunkt ausleuchtet, kann einer endlichen Anzahl zuordenbarer Punkte auf dem Diffusor zugeordnet werden. An diesen kann dann durch Graufilter der Strahlungsfluss und damit im Gesamten die Uniformität beeinflusst werden. Holographische Diffusoren, welche beispielsweise aufgrund von Fertigungstoleranzen die Feldebene nicht in gewünschter Weise homogen ausleuchten, können in ähnlicher Weise wie der holographische Diffusor berechnet und ausgelegt werden, mit dem Unterschied, dass dieser Korrekturfilter nur kleine Änderungen auf dem Strahlungsfluss ausübt und daher weniger empfindlich und z.B. günstiger als reines Absorptionsfilter ausgelegt werden kann. Wird der Diffusor beispielsweise durch eine Vielzahl von Prismen oder Spiegeln realisiert, wie von Kurtz et al., Design and synthesis of random phase diffusers, J. Opt. Soc. Am. 63, p. 1080 – 1092 (1973) gezeigt, so kann mit dem erfindungsgemäßen Filter- oder Korrekturlement die Abstrahlcharakteristik eines solchen Diffusors korrigiert werden.

Mit der vorliegenden Erfindung wird erstmalig ein Beleuchtungssystem mit einem Wabenkondensor angegeben, der bei gleichzeitiger Konstanz der Pupillenausleuchtung über die auszuleuchtende Feldebene eine homogene

5 Ausleuchtung der Feldebene ermöglicht. Dabei wird eine Konstanz der Pupillenausleuchtung, ausgedrückt durch die geringe  $\sigma$ -Variation von weniger als 10%, bei gleichzeitig homogener Ausleuchtung mit Abweichungen von der idealen Uniformität von weniger als 0.5% gegeben. Das erfindungsgemäße Filterelement ermöglicht neben der homogenen Ausleuchtung gleichzeitig die Erhaltung der Telezentrieigenschaften und des Abbildungssettings zur kontrastreichen Abbildung in der Mikrolithographie von Halbleiterstrukturen.

### Patentansprüche

- 5
- 10
- 15
- 20
- 25
- 30
1. Beleuchtungssystem für die Mikrolithographie, insbesondere für Wellenlängen  $\leq 193$  nm, besonders bevorzugt für die EUV-Lithographie zur Ausleuchtung eines Feldes in einer Feldebene mit wenigstens einem optischen Integrator, der ein Lichtbündel, das von einer Lichtquelle emittiert wird in eine Vielzahl von Lichtkanälen mit einer Lichtintensität aufspaltet dadurch gekennzeichnet, dass im Lichtweg von der Lichtquelle zur Feldebene ein Filter vorgesehen ist, wobei der Filter Filterelemente umfasst, die derart aufgebaut sind, dass die Lichtintensität wenigstens eines Lichtkanals im Lichtweg nach dem Filterelement abgeschwächt wird.
  2. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Abschwächung der gesamten Lichtintensität des wenigstens einen Lichtkanals nach dem Filterelement im Bereich  $>0$  bis  $<100$  % der gesamten Lichtintensität des jeweiligen Lichtkanals vor dem Filterelement liegt.
  3. Beleuchtungssystem nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Abschwächung der gesamten Lichtintensität des wenigstens einen Lichtkanals nach dem Filterelement im Bereich  $>25$  % bis  $<80$  % der gesamten Lichtintensität des jeweiligen Lichtkanals vor dem Filterelement liegt.
  4. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 2 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der wenigstens eine Lichtkanal eine Fläche des Filterelementes ausleuchtet und das Filterelement derart aufgebaut ist, dass die Abschwächung der Lichtintensität an unterschiedlichen Orten der ausgeleuchteten Fläche unterschiedlich groß ist.

5. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 2 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass  
der wenigstens eine Lichtkanal eine Fläche des Filterelementes ausleuchtet und das Filterelement derart aufgebaut ist, dass die Abschwächung der Lichtintensität an unterschiedlichen Orten der ausgeleuchteten Fläche gleich ist.
6. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass das Filterelement zur Abschwächung der Lichtintensität wenigstens eines Lichtkanals ein diesem Lichtkanal zugeordneten Transmissionsfilterelement umfasst.
7. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass das Filterelement zur Abschwächung der Lichtintensität wenigstens eines Lichtkanals eine diesem Lichtkanal zugeordnete reflektive optische Komponente mit einer der Abschwächung angepassten Reflektivität umfasst.
8. Beleuchtungssystem nach einem der Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das dem Lichtkanal zugeordnete Transmissionsfilter ein variabler Graufilter ist.
9. Beleuchtungssystem nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Graufilter eine variable Linien- und/oder Punktdichte aufweist, so dass die Grauwerte des Graufilters durch die Linien- und/oder Punktdichte eingestellt werden kann.
10. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Filterelement zur Abschwächung der Lichtintensität wenigstens eines Lichtkanals eine diesem Lichtkanal zugeordnete Blende umfasst.

- 5
- 10
- 15
- 20
- 25
- 30
11. Beleuchtungssystem für die Mikrolithographie, insbesondere mit Wellenlängen  $\leq 193$  nm, besonders bevorzugt für die EUV-Lithographie zur Ausleuchtung eines Feldes in einer Feldebene mit wenigstens einem optischen Integrator, wenigstens einer optischen Komponente, die im Lichtweg von einer Lichtquelle zu der auszuleuchtenden Feldebene zwischen dem optischen Integrator und der auszuleuchtenden Feldebene angeordnet ist, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Komponente ausreichend aplanatisch korrigiert ist, und das Beleuchtungssystem wenigstens ein Filterelement umfasst, das derart ausgestaltet und angeordnet ist, dass eine weitgehend homogene Ausleuchtung des Feldes in der Feldebene erreicht wird.
  12. Beleuchtungssystem nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Komponente derart aplanatisch korrigiert ist, dass in der Feldebene die  $\sigma$ -Variation weniger als 10 %, besonders bevorzugt weniger als 2 % beträgt.
  13. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Feld ein Ringfeld ist mit einer radialen und einer azimuthalen Ausdehnung.
  14. Beleuchtungssystem nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass das optische Element wenigstens eine feldformende optische Komponente umfasst und das optische Element wenigstens in der radialen Ausrichtung der Pupillenabbildung ausreichend aplanatisch korrigiert ist.
  15. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass das Filterelement im Lichtweg von der Lichtquelle zur Feldebene nahe dem optischen Integrator als separates Bauteil angeordnet ist oder in den optischen Integrator integriert ist.

- 5
16. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass das Filterelement im Lichtweg von der Lichtquelle zur Feldebene vor und in der Nähe des optischen Integrators angeordnet ist.
17. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass das Filterelement im Lichtweg von der Lichtquelle zur Feldebene nach und nahe dem optischen Integrator angeordnet ist.
- 10
18. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Integrator wenigstens ein erstes optisches Element mit einer Vielzahl von ersten Rasterelementen umfasst.
- 15
19. Beleuchtungssystem nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Integrator ein zweites optisches Element mit einer Vielzahl von zweiten Rasterelementen umfasst.
- 20
20. Beleuchtungssystem nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass ein Filter mit einer Vielzahl von Filterelementen im Lichtweg von der Lichtquelle zur Feldebene zwischen dem ersten optischen Element mit einer Vielzahl von ersten Rasterelementen und dem zweiten optischen Element mit einer Vielzahl von zweiten optischen Rasterelementen angeordnet ist.
- 25
21. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 11 bis 20, dadurch gekennzeichnet, dass das Filterelement ein transmissives Filterelement mit variabler Transmission ist.
- 30
22. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 11 bis 20, dadurch gekennzeichnet, dass das Filterelement ein reflektives Filterelement mit variabler Reflektivität ist.

23. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 21 bis 22, dadurch gekennzeichnet, dass das Filterelement ein variabler Graufilter ist.
24. Beleuchtungssystem nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass der Graufilter eine variable Linien- und/oder Punktdichte aufweist, so dass die Grauwerte des Graufilters durch die Linien- und/oder Punktdichte eingestellt werden können.
25. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass das Filterelement tauschbar ist.
26. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit Wellenlängen  $\leq 193$  nm, insbesondere für die EUV-Mikrolithographie mit einer Lichtquelle einem Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 25 zur Ausleuchtung eines Feldes in einer Feldebene einem Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in der Feldebene angeordneten Objektes in ein Bild in einer Bildebene.
27. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie vom Scanner-Typ mit Wellenlängen  $\leq 193$  nm, insbesondere für die EUV-Mikrolithographie mit einer Lichtquelle einem Beleuchtungssystem, wobei das Beleuchtungssystem umfasst: wenigstens einen optischen Integrator wenigstens ein optisches Element, das im Lichtweg von der Lichtquelle zu einer auszuleuchtenden Feldebene zwischen optischem Integrator und auszuleuchtender Feldebene angeordnet ist, wobei in der Feldebene ein Feld ausgeleuchtet wird, das eine Ausdehnung in Scan-Richtung aufweist und eine Ausleuchtungsintensität senkrecht zur Scan-Richtung und das optische Element ausreichend aplanatisch korrigiert ist, und



das Beleuchtungssystem eine Vielzahl von Filterelementen umfasst, die derart ausgestaltet und angeordnet sind, dass eine weitgehend homogene Ausleuchtung des Feldes in der Feldebene senkrecht zur Scan-Richtung erreicht wird, so dass die Uniformitätsfehler der Scan-Energie in der Feldebene weniger als  $\pm 3 \%$ , bevorzugt weniger als  $\pm 1 \%$ , besonders bevorzugt weniger als  $0,5 \%$  betragen, wobei die Scan-Energie die in Scan-Richtung integrierte Ausleuchtungsintensität des Feldes ist und einem Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in der Feldebene angeordneten Objektes in ein Bild in der Bildebene.

- 5
- 10
28. Verfahren zur Herstellung von mikrostrukturierten Bauteilen mit Hilfe der Mikrolithographie unter Verwendung einer Projektionsbelichtungsanlage gemäß einem der Ansprüche 26 bis 27.

## Beleuchtungssystem für die Mikrolithographie

### Zusammenfassung

5 Die Erfindung betrifft ein Beleuchtungssystem für die Mikrolithographie, insbesondere mit Wellenlängen  $\leq 193$  nm, besonders bevorzugt für die EUV-Lithographie zur Ausleuchtung eines Feldes in einer Feldebene mit

- 10 - wenigstens einem optischen Integrator, wenigstens einer optischen Komponente, das im Lichtweg von einer Lichtquelle zu der auszuleuchtenden Feldebene zwischen dem optischen Integrator und der auszuleuchtenden Feldebene angeordnet ist, dadurch gekennzeichnet, dass
- 15 - die optische Komponente ausreichend aplanatisch korrigiert ist, und das Beleuchtungssystem wenigstens ein Filterelement umfasst, das derart ausgestaltet und angeordnet ist, dass eine weitgehend homogene Ausleuchtung des Feldes in der Feldebene erreicht wird.

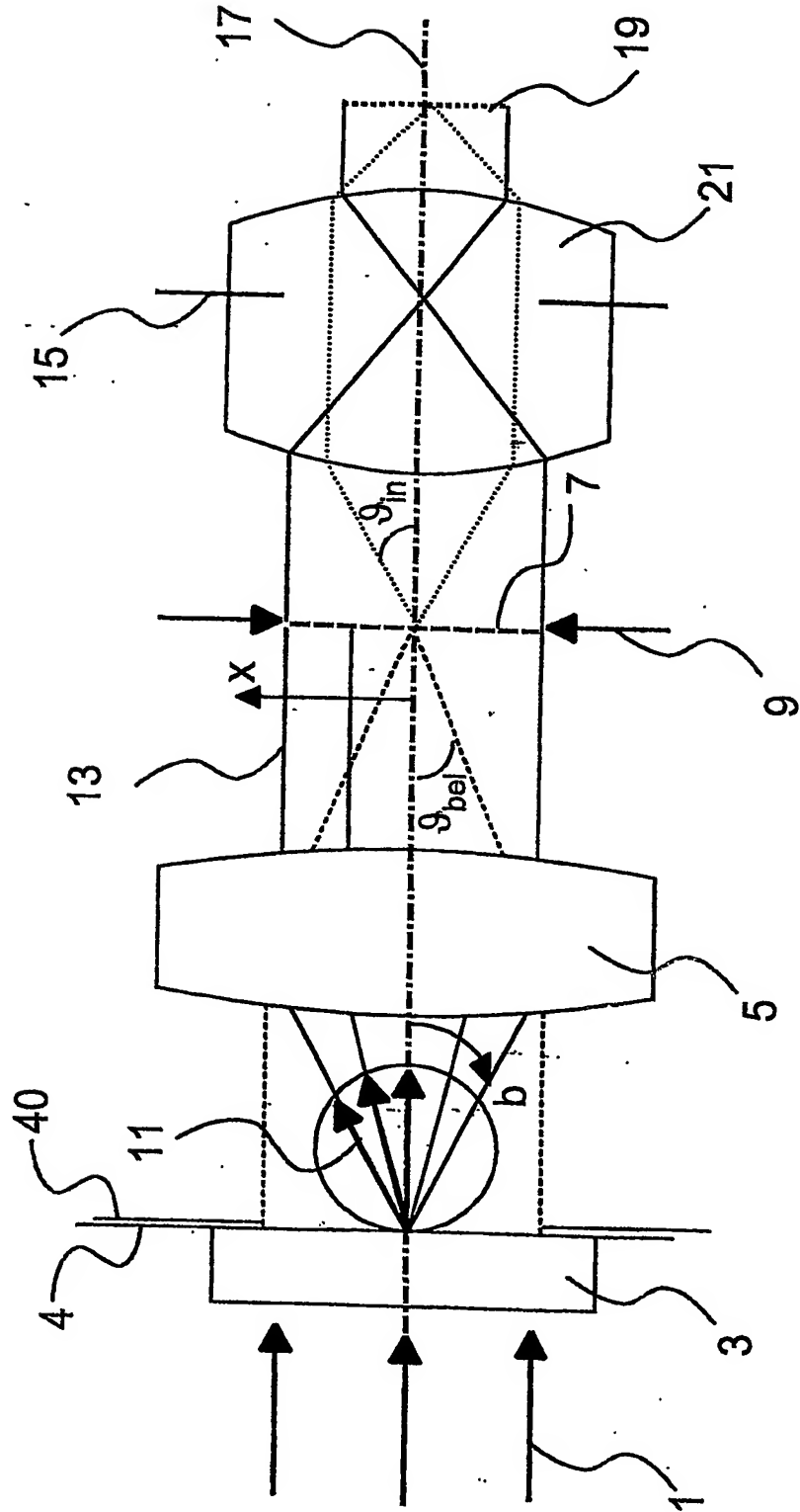
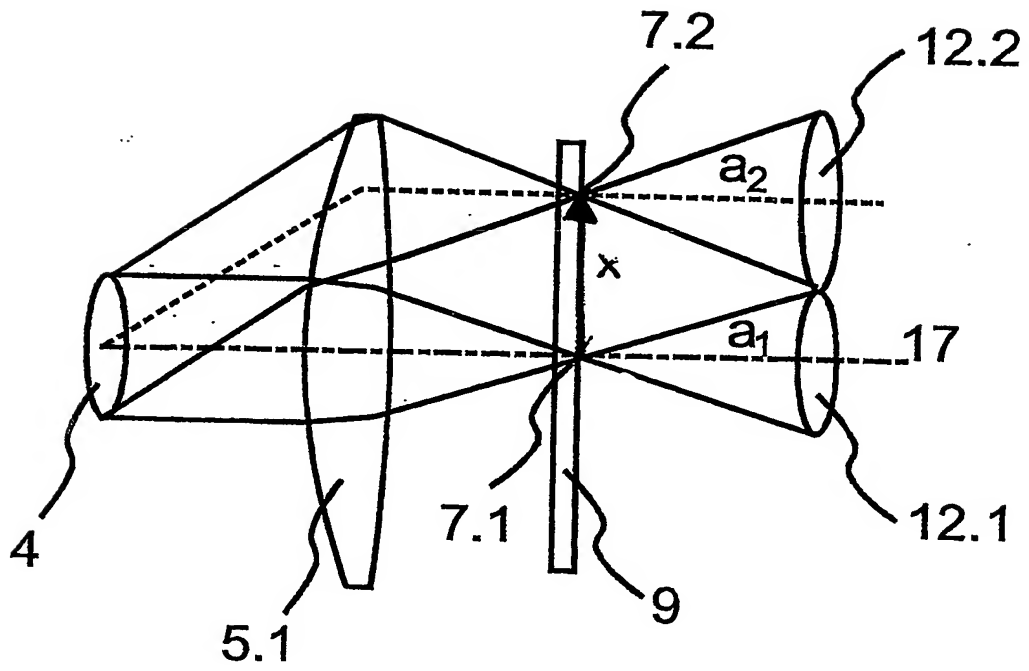


Fig. 1

2.



**Fig. 2**

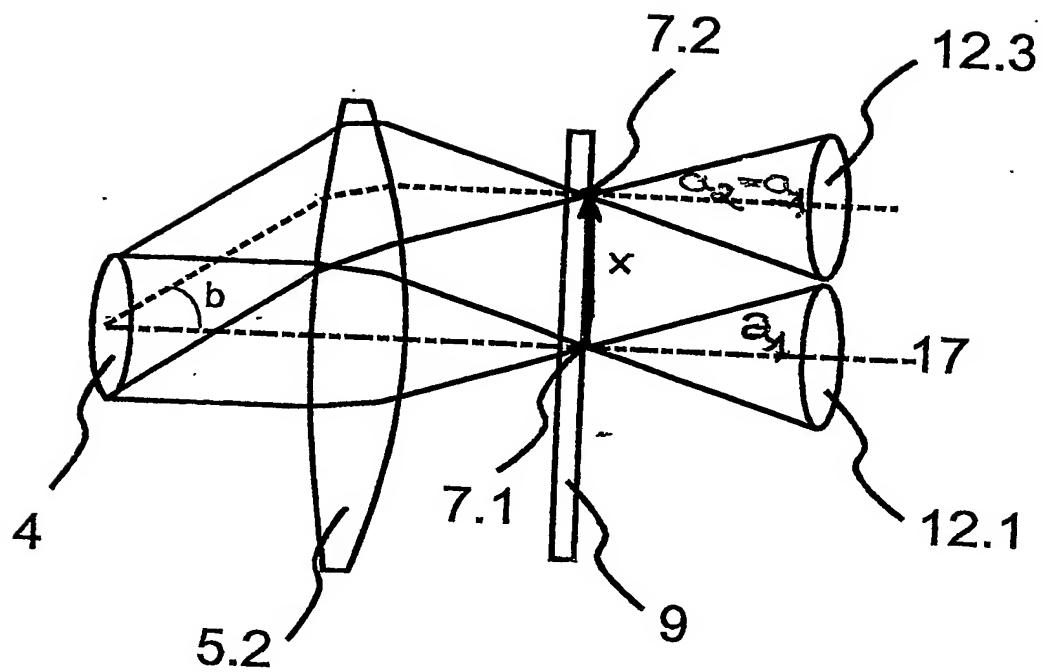


Fig. 3

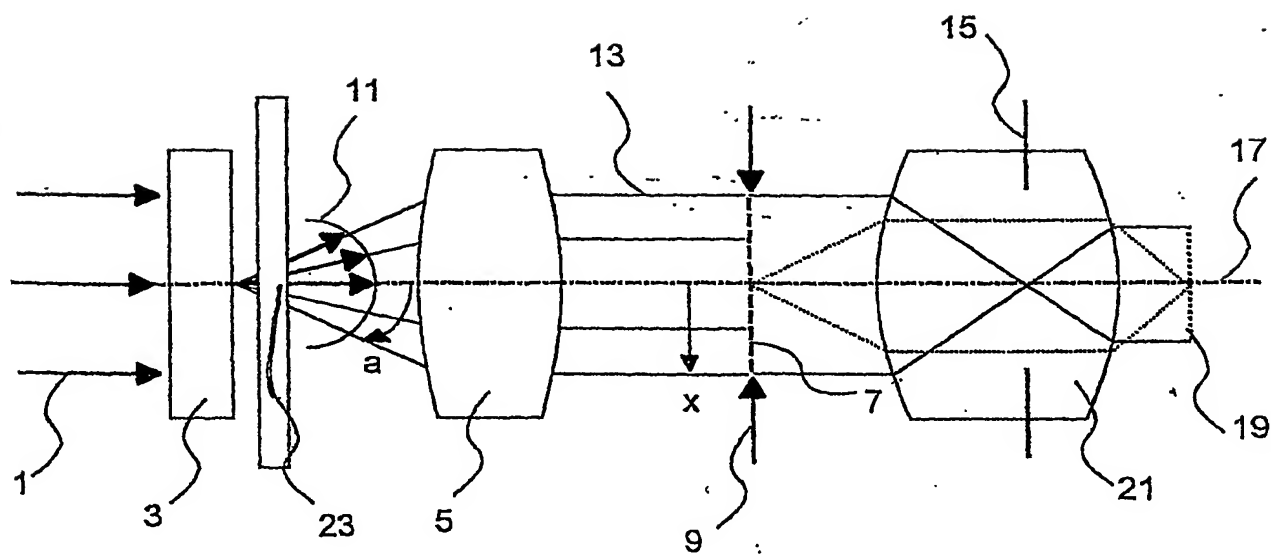


Fig. 4

48

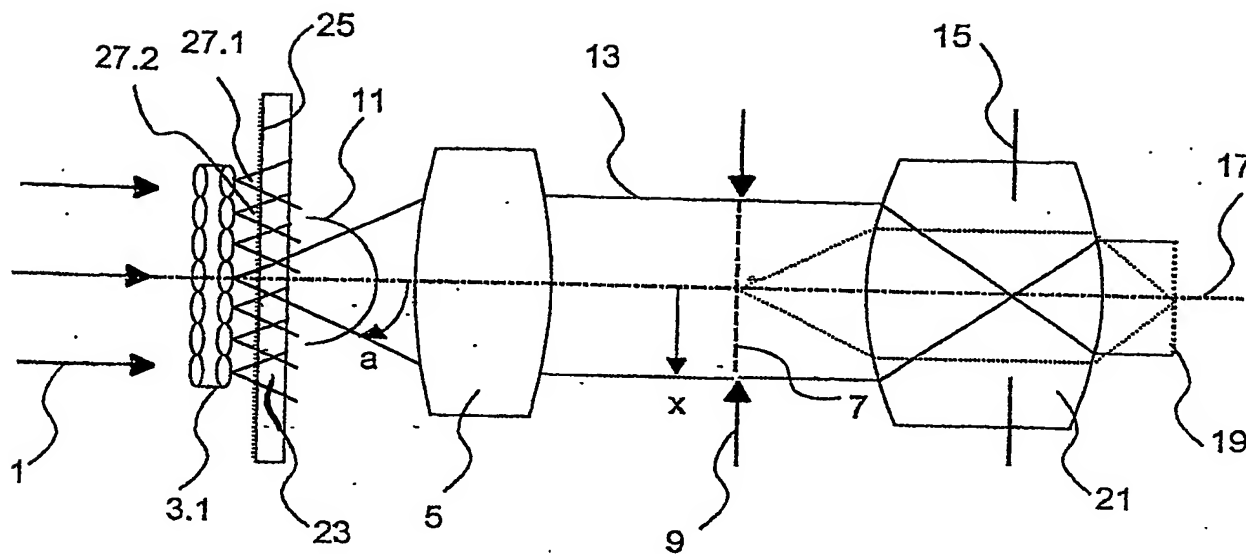


Fig. 5

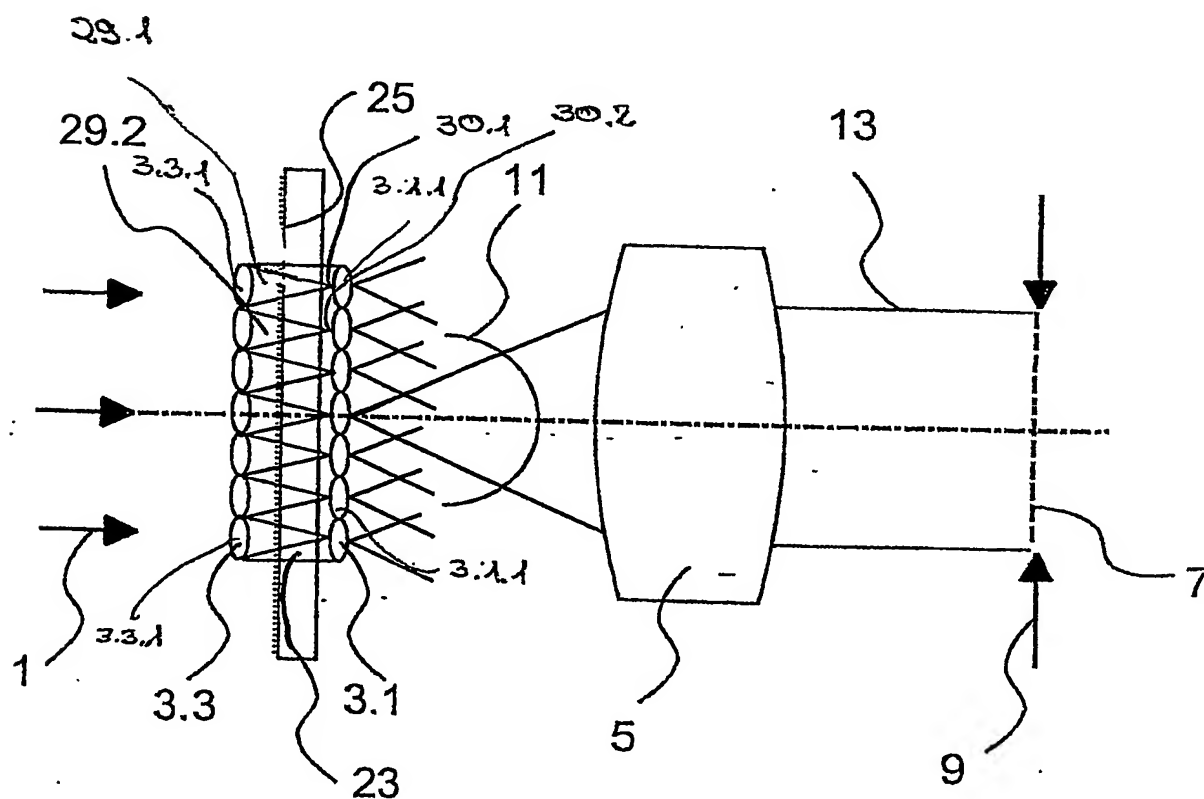


Fig. 6.

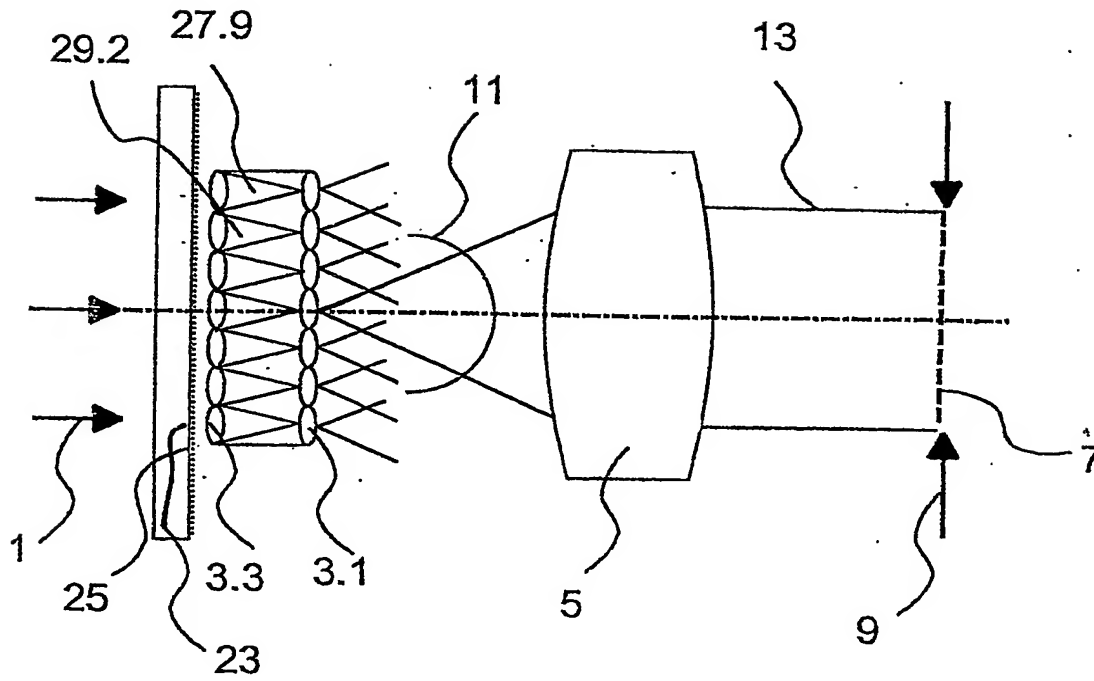
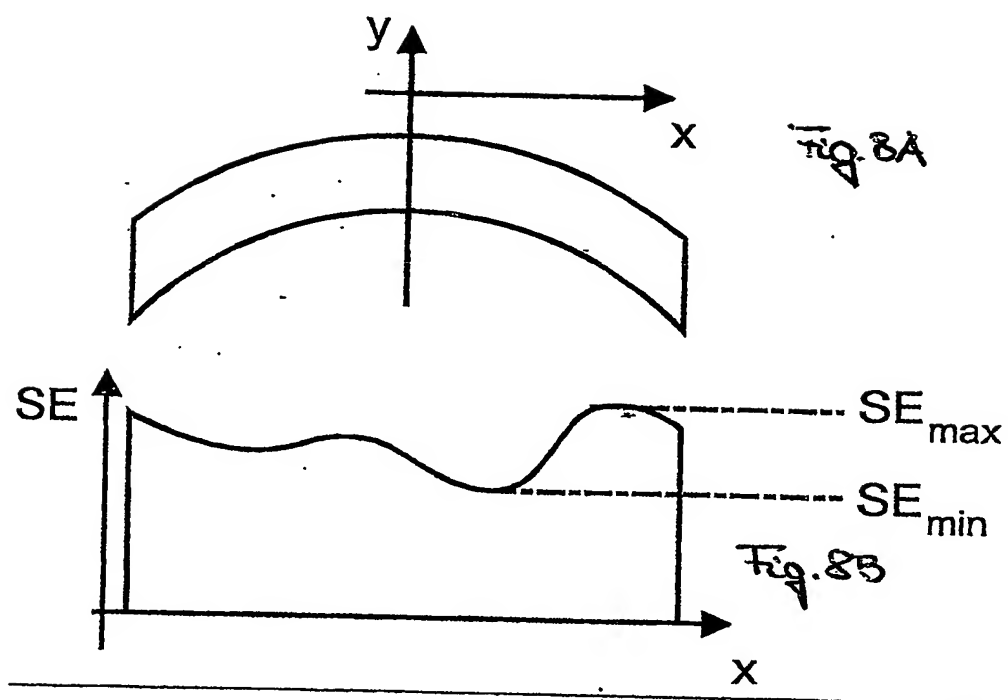


Fig. 7





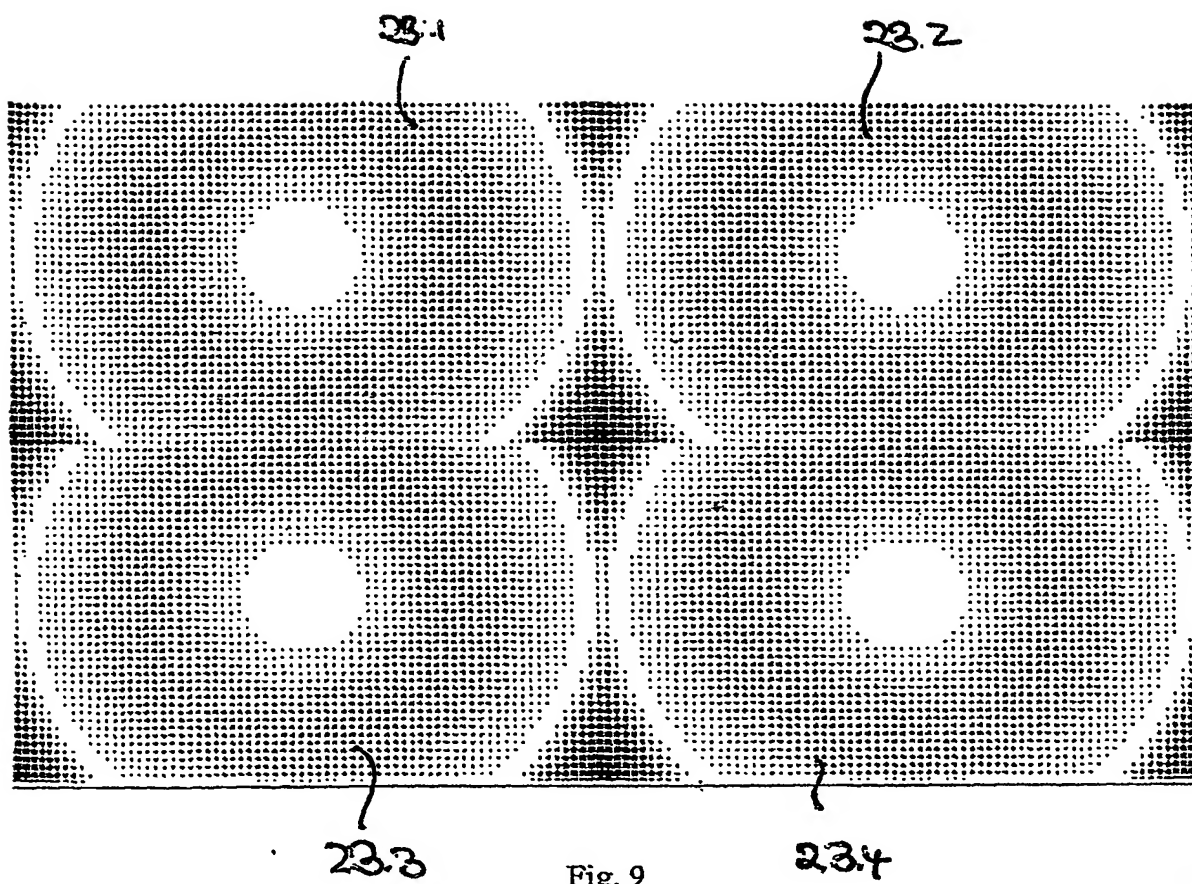


Fig. 9

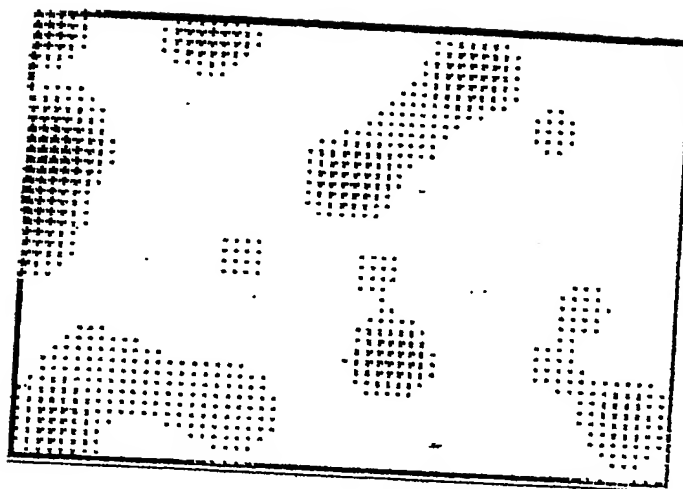
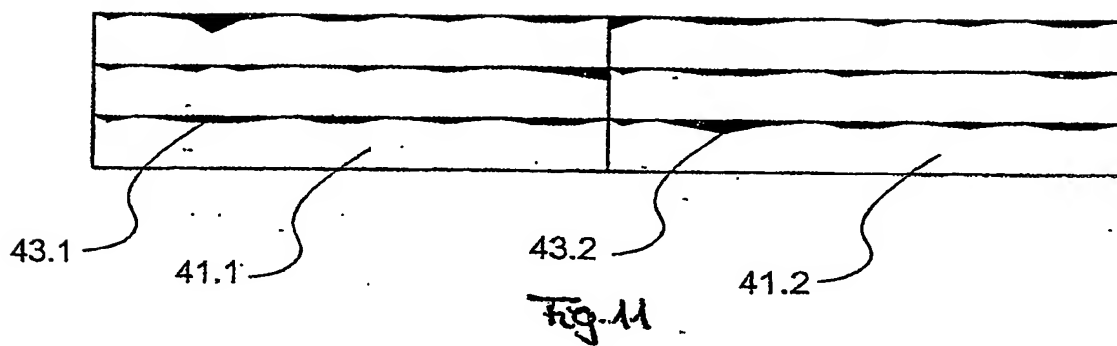


Fig. 10



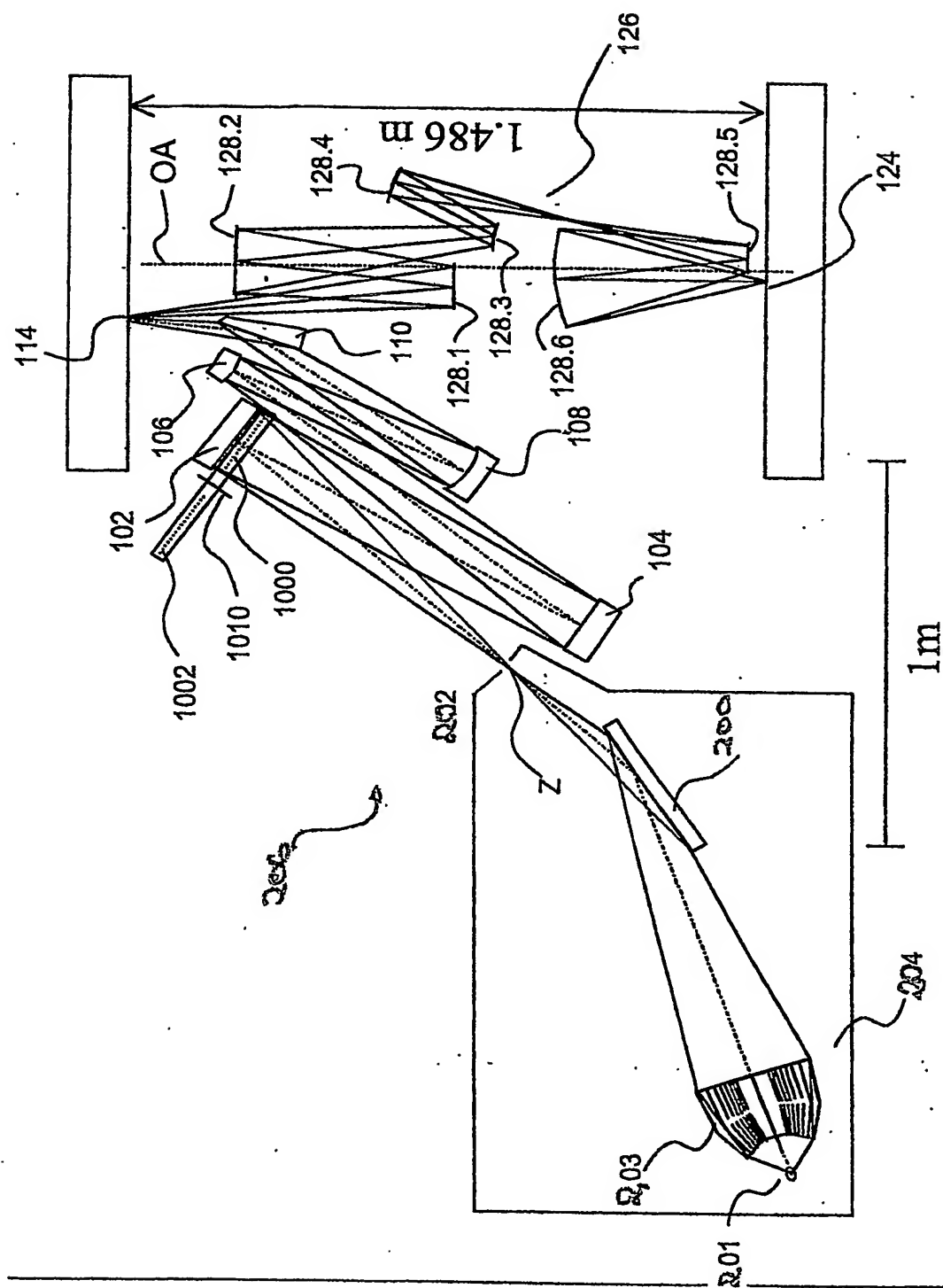
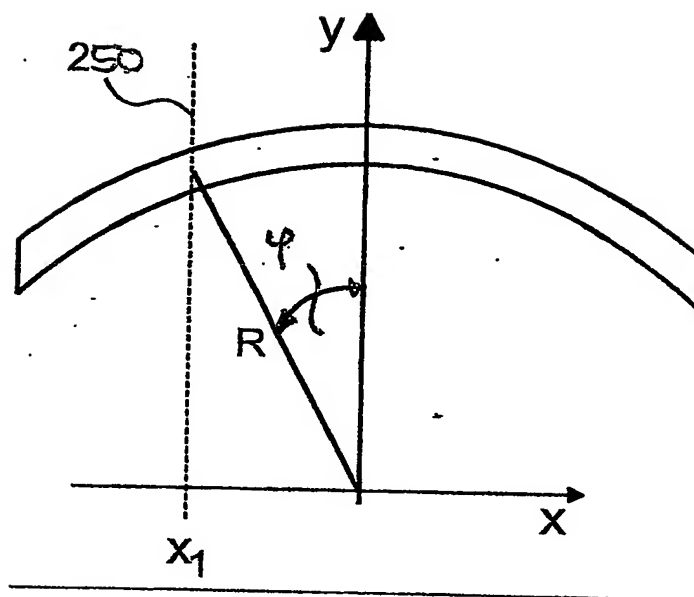
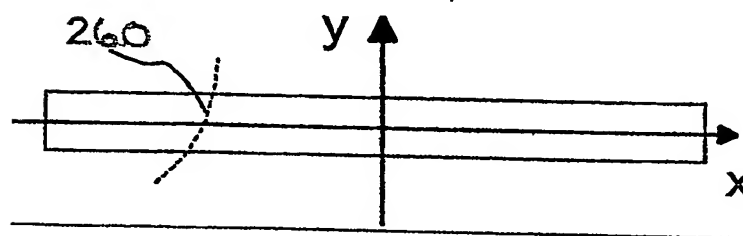


Fig. 12

Fig. 13Fig. 14

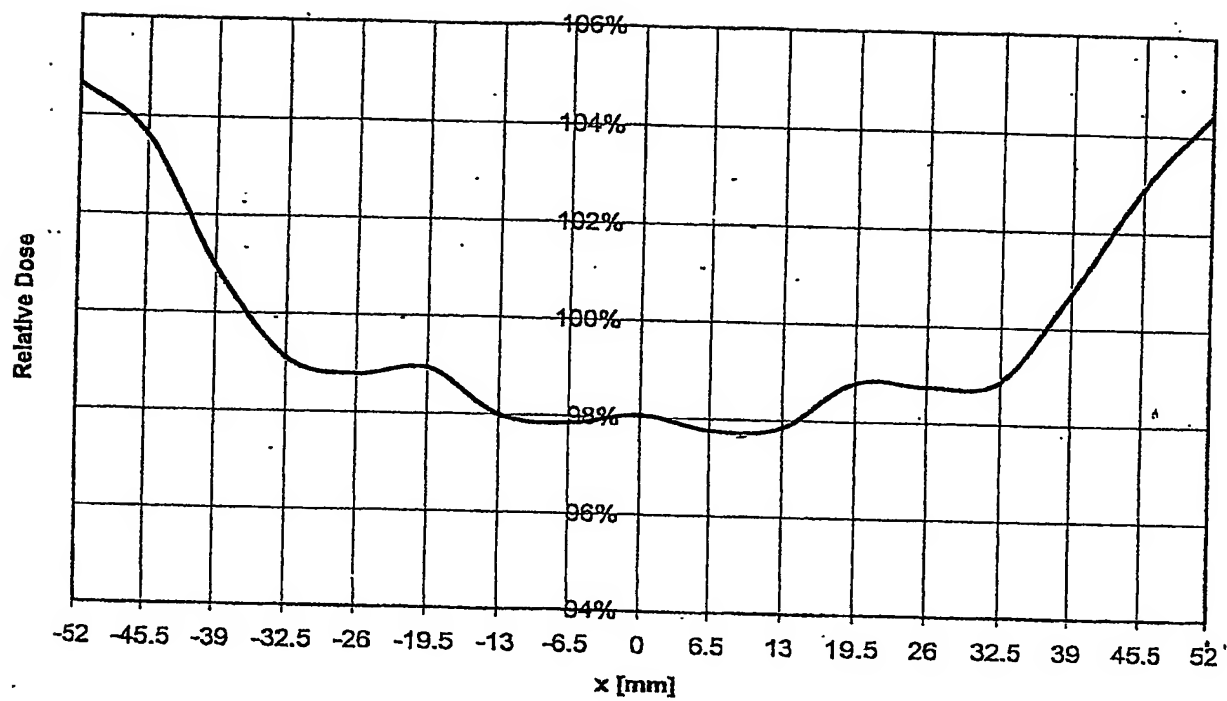


Fig. 15

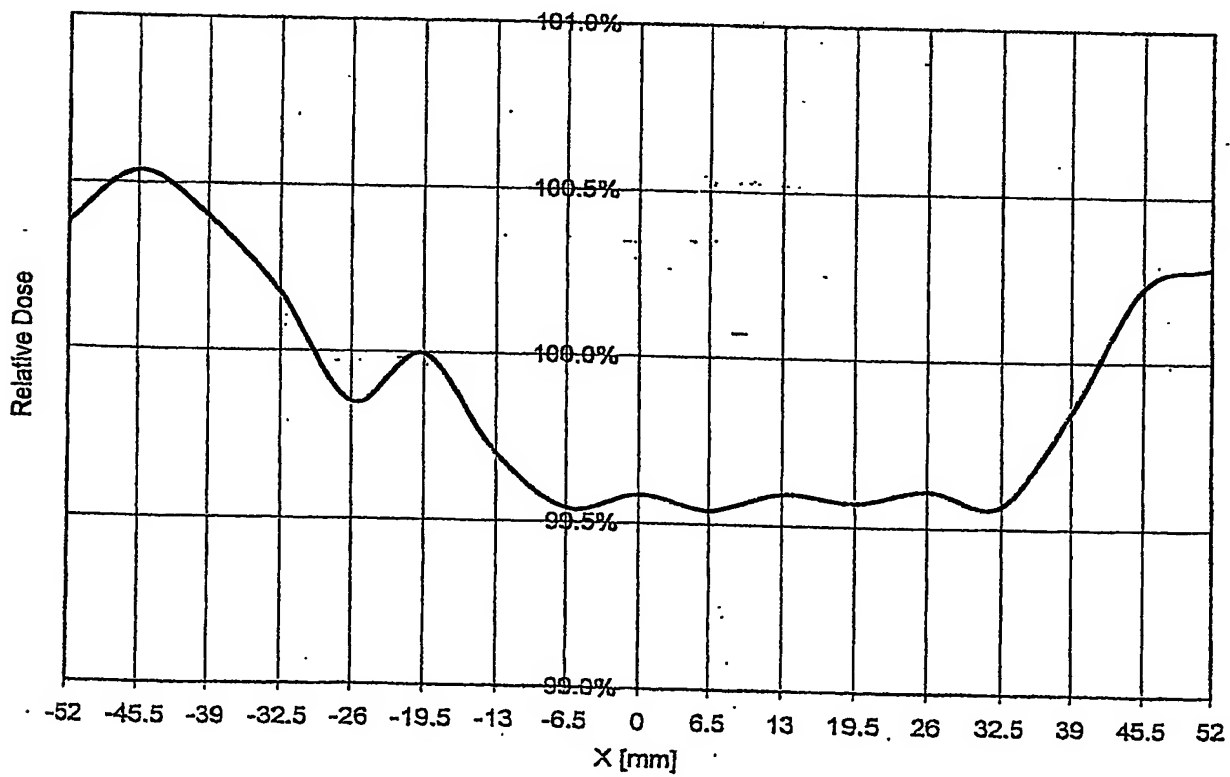


Fig. 16

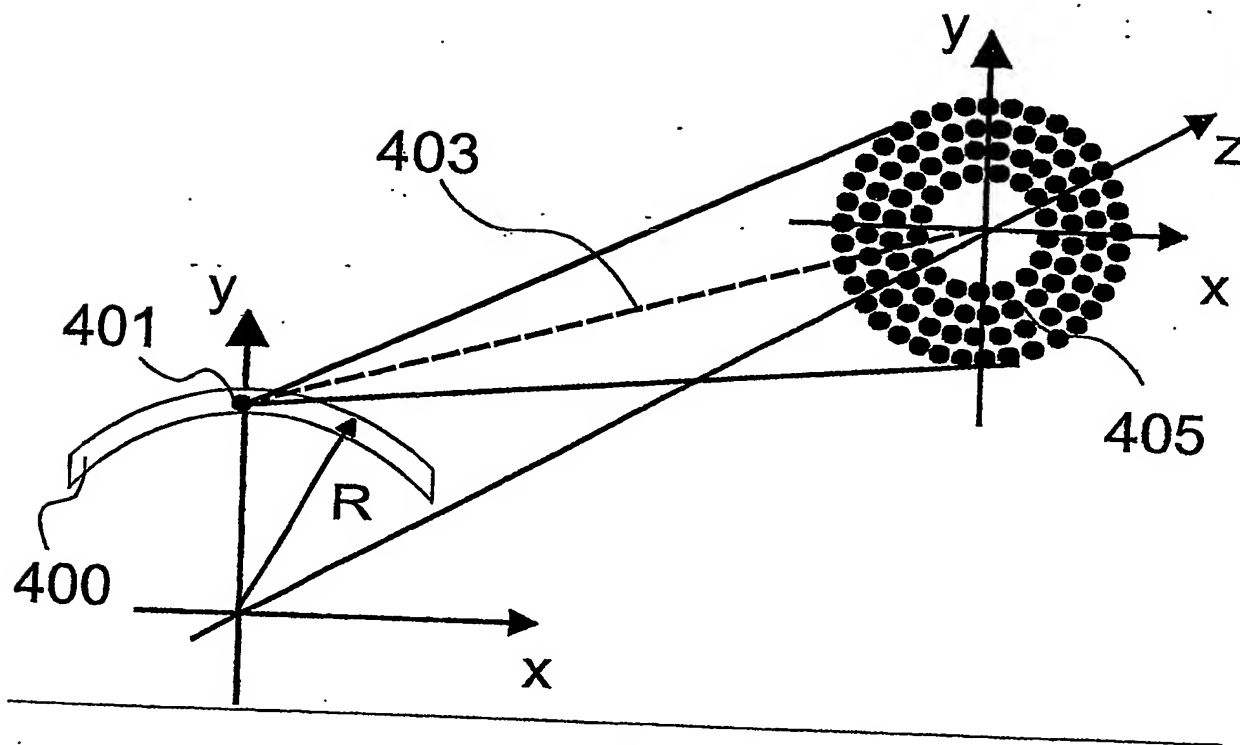


Fig. 17A



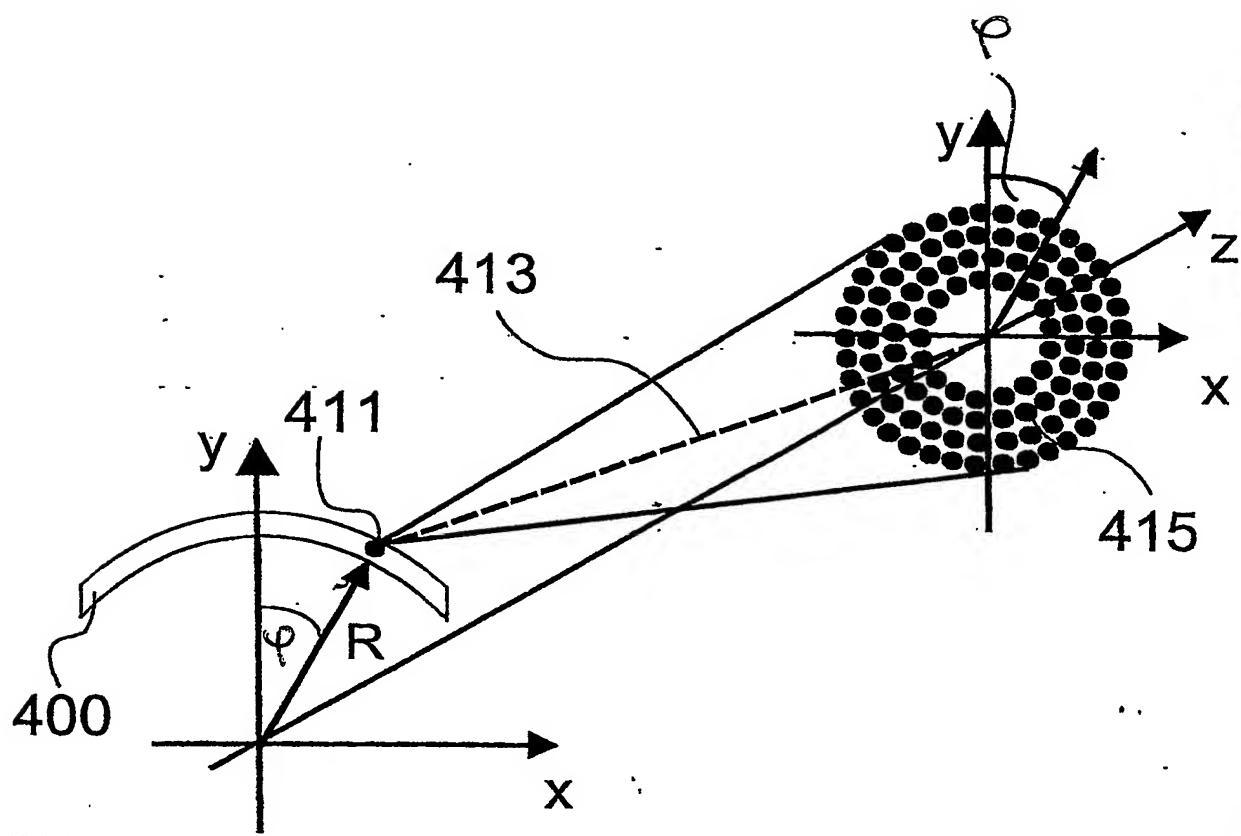
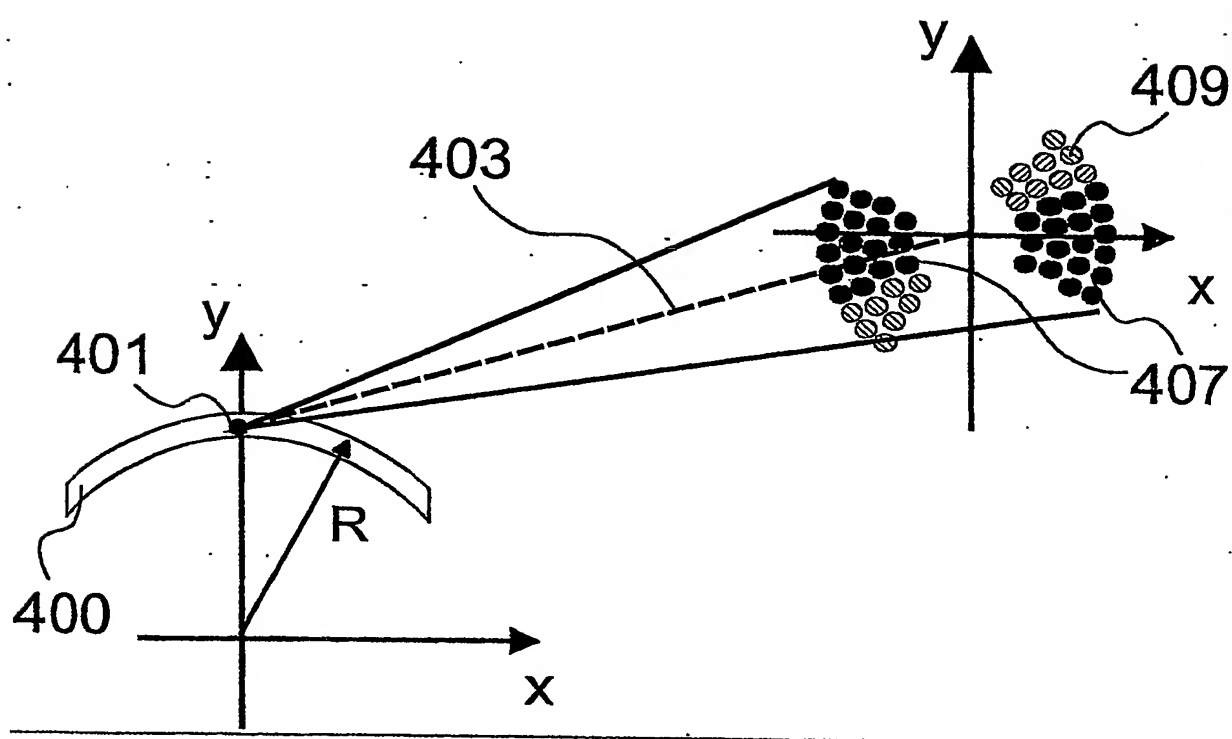
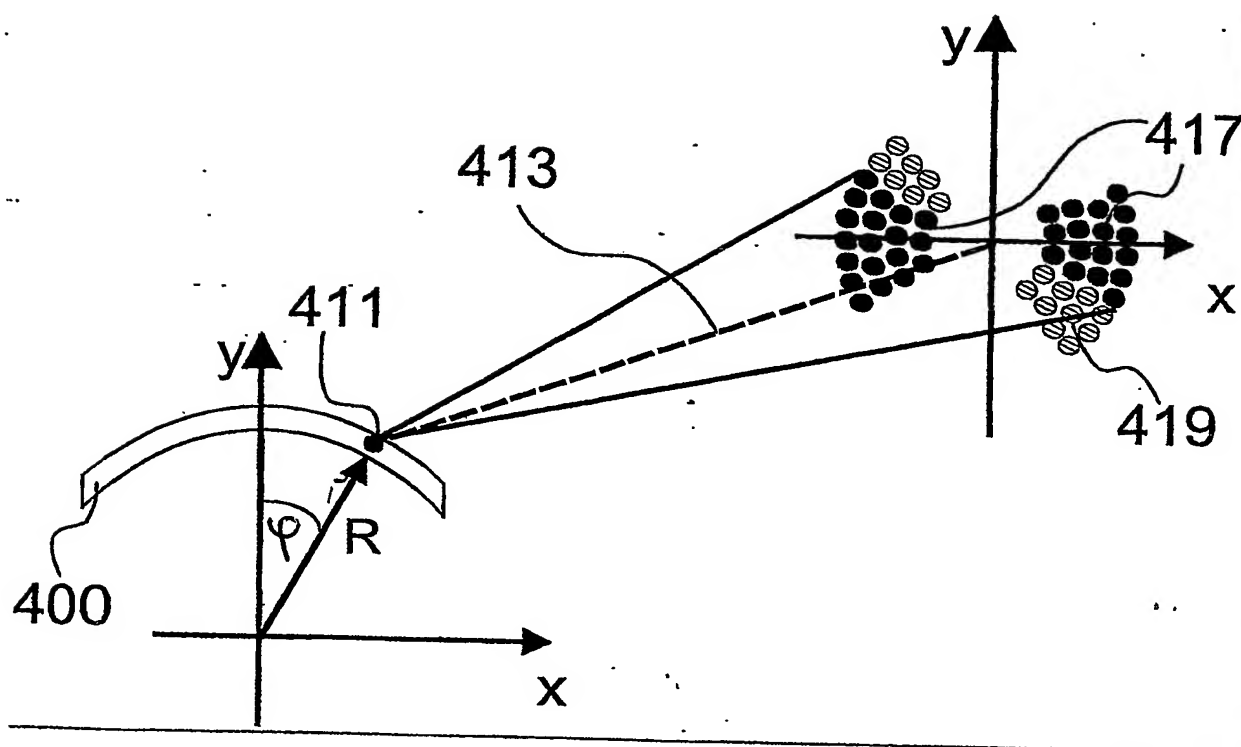


Fig. 17B

Fig. 18A

Fig. 18P

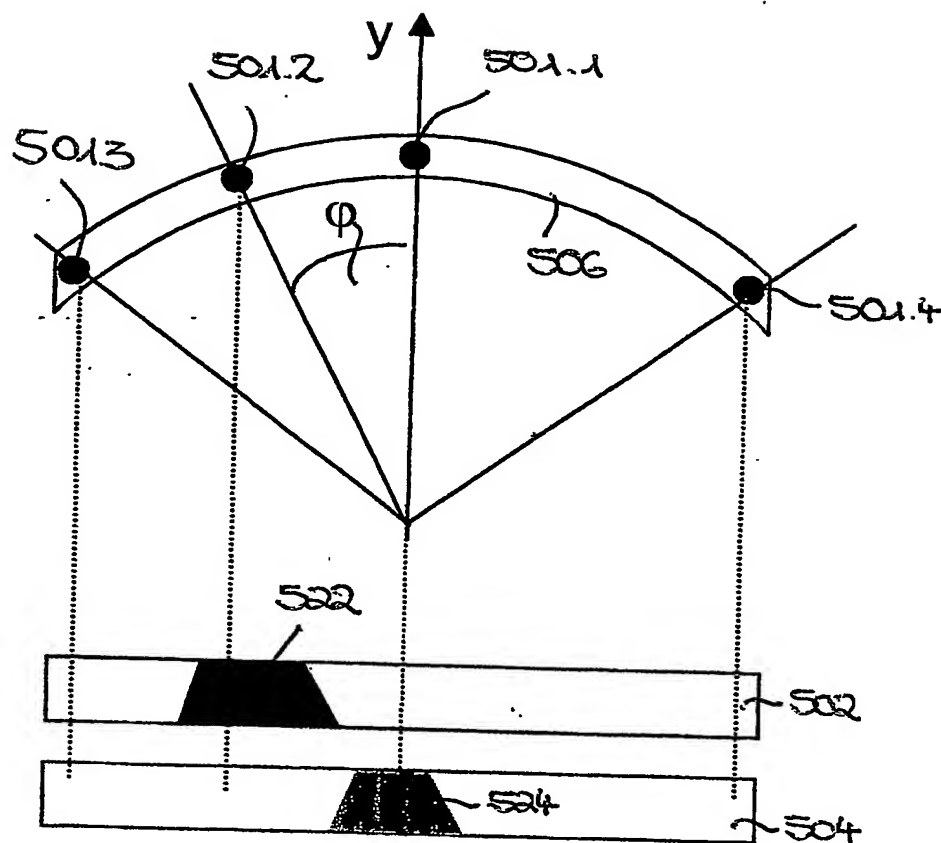


Fig. 19

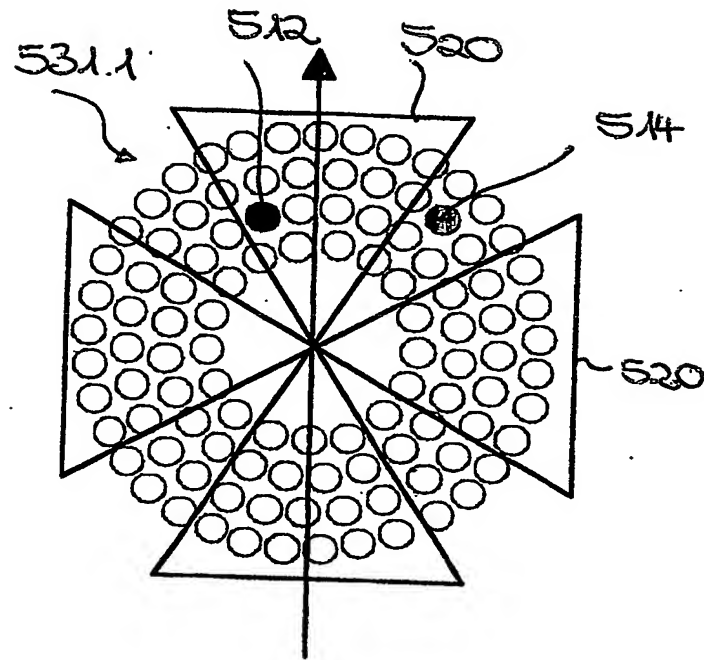


Fig. 20.

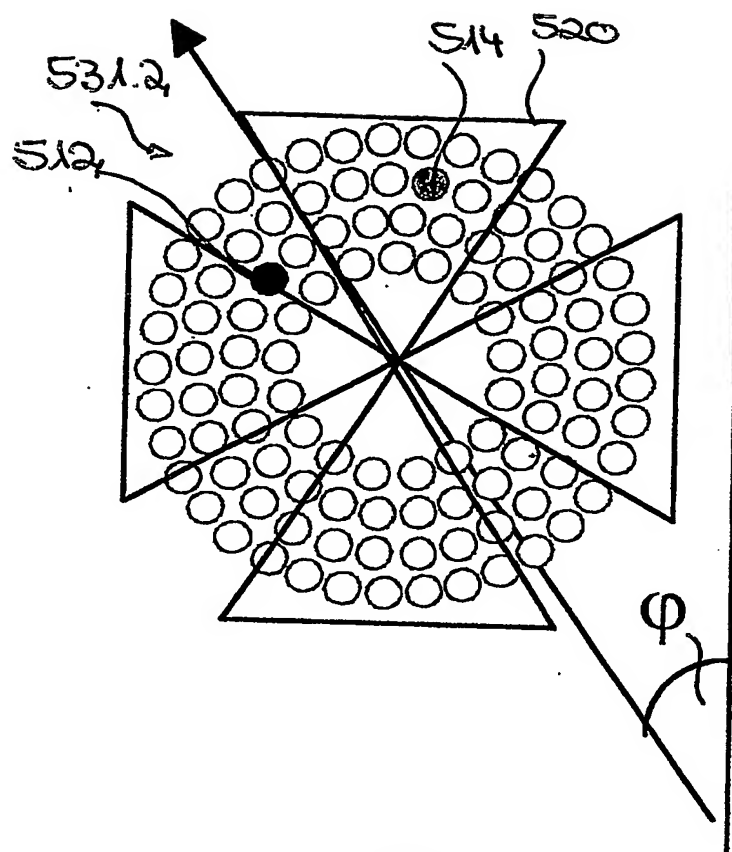


Fig. 21

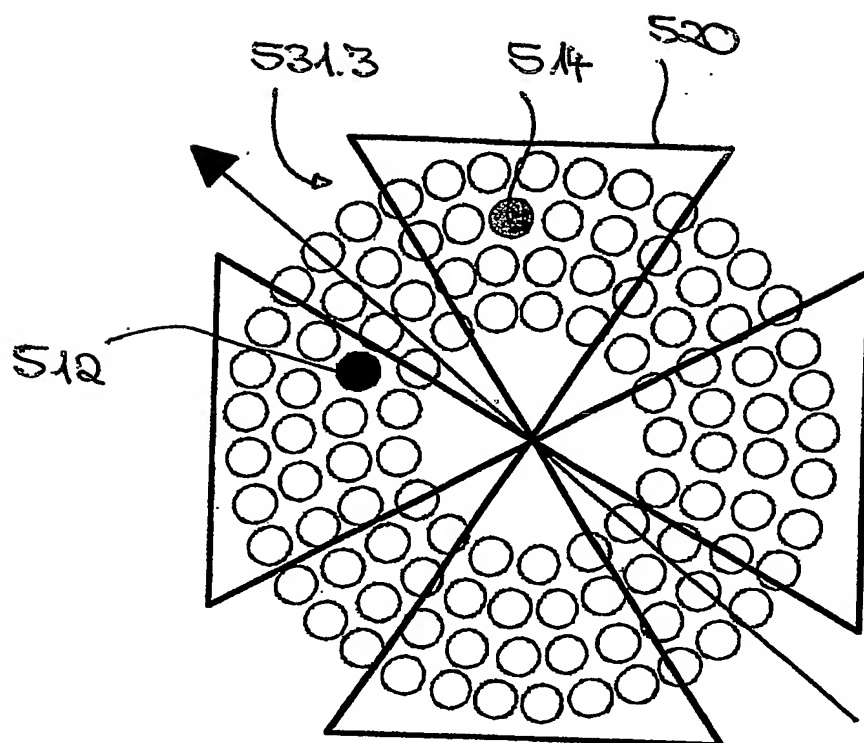


Fig. 22

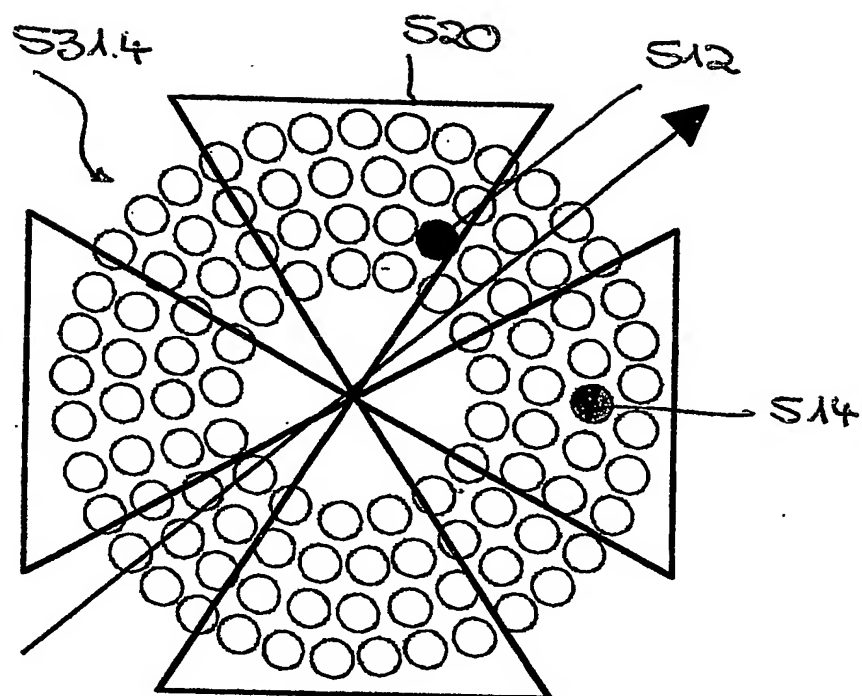


Fig. 23



FIG. 24

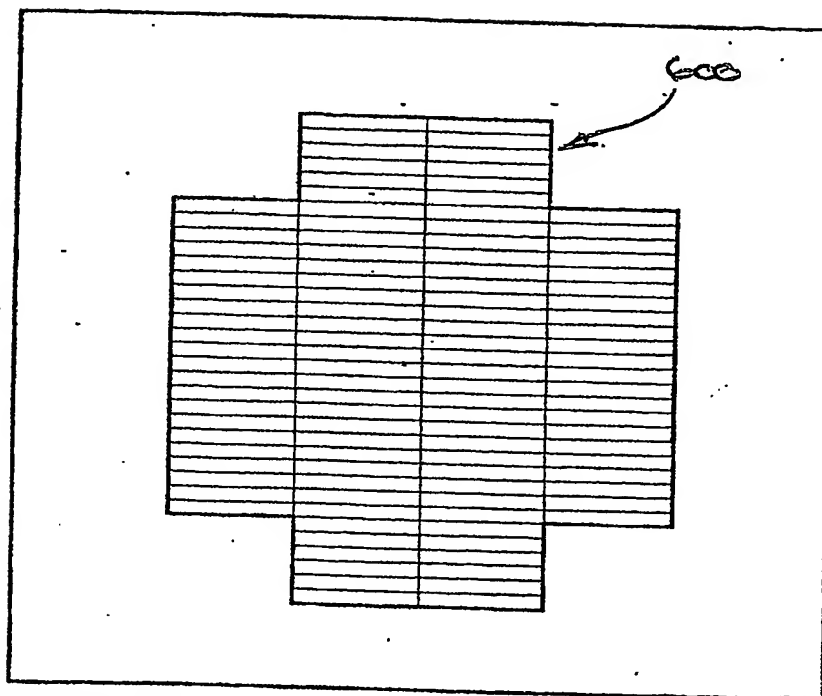
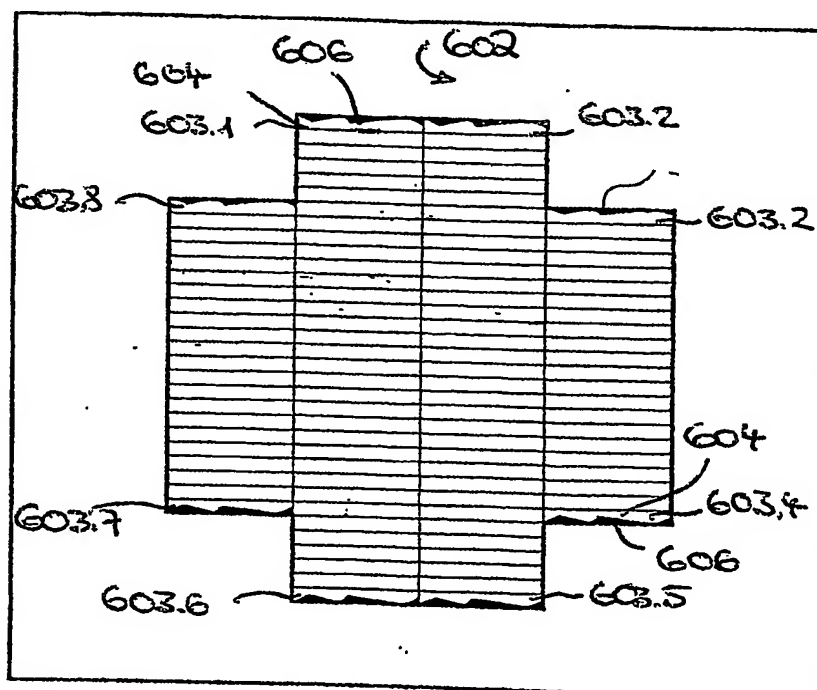


FIG. 25



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☒ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER: \_\_\_\_\_**

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**